



BACHELORARBEIT

Herr
Thomas Hauche

**Breitbandlautsprecher für
Studio Monitoring**

2014

BACHELORARBEIT

Breitbandlautsprecher für Studio Monitoring

Autor:
Herr Thomas Hauche

Studiengang:
Medientechnik

Seminargruppe:
MT09 wH-B

Erstprüfer:
Prof. Dr.-Ing Michael Hösel

Zweitprüfer:
Prof. Dipl. Toningenieur Mike Winkler

Einreichung:
Mittweida, 06.08.2014

BACHELOR THESIS

Full Range Speaker for Studio Monitoring

author:

Mr. Thomas Hauche

course of studies:

Medientechnik

seminar group:

MT09 wH-B

first examiner:

Prof. Dr.-Eng Michael Hösel

second examiner:

Prof. Dipl. Audio-Engineer Mike Winkler

submission:

Mittweida, 06.08.2014

Bibliografische Angaben

Hauche, Thomas:

Breitbandlautsprecher für Studio Monitoring

Full Range Speaker for Studio Monitoring

43 Seiten, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences,
Fakultät Medien, Bachelorarbeit, 2014

Abstract

In den 1970er Jahren entstand in vielen Tonstudios ein Kult um einen kleinen Lautsprecher mit nur einem einzelnen verbauten Chassis. Das Konzept dieser Breitbandlautsprecher überzeugt selbst heute noch viele Musikproduzenten und Toningenieure. Dennoch blieben diese Lautsprecher am Markt für Tonstudiogeräte ein reines Nischenprodukt. Bei dem simplen Lautsprecherkonzept stellt sich die Frage, wieso diese Systeme in Studiokreisen als Referenz bezeichnet werden. In dieser Bachelorarbeit wird die Tauglichkeit von Breitbandsystemen als Studioregielautsprecher überprüft. Hierfür werden am Markt erhältliche Modelle und eine eigens konstruierte Breitbandlautsprecherbox eingemessen und mit Messdaten verschiedener Mehrwegesysteme verglichen. Die Messwerte werden anhand gültiger Standards für Studioregielautsprecher ausgewertet. Außerdem werden die klanglichen Qualitäten von Breitbandsystemen für den Einsatz bei diversen Mischpraktiken eingeschätzt. Durch die gesammelten Daten kann vom Einsatz des Breitbandlautsprecherkonzeptes als Hauptabhöre abgeraten werden.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	V
Formelverzeichnis.....	VI
Abbildungsverzeichnis	VII
1 Einleitung.....	1
2 Breitbandsysteme – theoretische Grundlagen	3
2.1 Nachteile	4
2.2 Vorteile.....	7
3 Breitbandsysteme im Studiosegment.....	10
4 Normen und Standards für Studio-Regie-Lautsprecher	12
5 DIY – Testbox	14
5.1 Gehäusevolumen und Resonanzfrequenz	16
5.2 Stehende Wellen und Gehäusedämpfung	19
5.3 Baffle Step Diffraction	21
6 Messungen	29
6.1 Amplitudenfrequenzgang und Abstrahlverhalten	30
6.2 Klirrfaktor	31
6.3 Sprungantwort.....	33
6.4 Auswertung	35
7 Klangbeurteilung.....	38
8 Breitbandsysteme in der Studiopraxis	40
9 Schlussbetrachtungen.....	42
Literaturverzeichnis	VIII
Anhang.....	X
Eigenständigkeitserklärung	XI

Formelverzeichnis

Formel 1: Gesamtgüte Q_{TC}	17
Formel 2: Boxenvolumen V_B	18
Formel 3: Resonanzfrequenz f_C nach der Güte	18
Formel 4: Resonanzfrequenz f_C nach dem Volumen	18
Formel 5: Grenzfrequenz f_{max} der Bündelung	18
Formel 6: Erregerfrequenz f_E für stehende Wellen.....	19
Formel 7: Baffle-Step-Frequenz f_{Step} – Näherungsrechnung	22
Formel 8: Induktivität L der Spule für Grenzfrequenz f_G :	24
Formel 9: Kapazität C des Kondensators für Grenzfrequenz f_G	24
Formel 10: Sperrkreis Mittenfrequenz f_M	25
Formel 11: Widerstand R für Impedanzentzerrung	26
Formel 12: Kapazität C des Kondensators für Impedanzentzerrung	26
Formel 13: Widerstand R für Sperrkreis	26
Formel 14: Korrigierte Gesamtgüte des Chassis	27
Formel 15: Klirrfaktor k	32

C	Kapazität eines Kondensators	[F]
f_C	Resonanzfrequenz des eingebauten Lautsprechers	[Hz]
f_S	Freiluftresonanzfrequenz	[Hz]
L	Induktivität einer Spule	[H]
L_S	Schwingspuleninduktivität des Lautsprechers	[H]
Q_{TS}	Güte-Faktor des nicht eingebauten Lautsprechers	[-]
Q_{TC}	Gütefaktor des eingebauten Lautsprechers	[-]
R	Ohmscher Widerstand	[Ω]
R_L	Ohmscher Widerstand der Spule	[Ω]
R_{DC}	Gleichstromwiderstand der Schwingspule	[Ω]
V_{AS}	Äquivalentes Luftnachgiebigkeitsvolumen	[l]
V_B	Gehäusevolumen eines Lautsprechers	[l]
Z	Impedanz des Lautsprechers	[Ω]

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schnittzeichnung eines Konus-Lautsprechers	3
Abbildung 2: Nawi-Membran	4
Abbildung 3: Zonen entgegengesetzter Membranbewegungen	4
Abbildung 4: Sonogramm eines Breitbanders.....	6
Abbildung 5: Phantomschallquelle.....	9
Abbildung 6: Lokalisation.....	9
Abbildung 7: Der akustische Kurzschluss – schematisch	15
Abbildung 8: Q-Faktoren	17
Abbildung 9: Spannungsteiler.....	23
Abbildung 10: Verbiegeschaltung – Kondensator	23
Abbildung 11: Verbiegeschaltung – Spule	24
Abbildung 12: Sperrkreis	25
Abbildung 13: Impedanzentzerrung.....	26
Abbildung 14: Entzerrschaltung.....	27
Abbildung 15: Freifeldmessung bei ME Geithain	29
Abbildung 16: Sprungfunktion	33
Abbildung 17: Sprungantwort	34

1 Einleitung

Im Jahre 1958 legte Jack Wilson, mit der Gründung seiner Firma Auratone™, den Grundsteine für die Erfolgsgeschichte eines kleinen Lautsprechers. 1960 kam der erste unscheinbare Auratone 5C Super Sound Cube auf den Markt. Zunächst mit bescheidenem Erfolg, avancierte der Sound Cube in den 1970er und 80er Jahren zu einem weltweiten Abhörstandard in allen großen Rock- und Pop-Produktionsstudios.¹ Mitte der 80er Jahre wurde er jedoch allmählich in den Tonstudios von den Yamaha NS10 ersetzt.² Heute sind die Auratones fast komplett vom Markt verschwunden und trotzdem wird von einigen namenhaften Produzenten der Kult um diese Lautsprecher aufrechterhalten. Produzent und Toningenieur Bruce Swedien ist von den kleinen Lautsprechern überzeugt. Gemeinsam mit Quincy Jones verhalf er den Michael-Jackson-Alben zu ihren unverwechselbaren Sound.

„Weißt du wie Quincy (Jones) sie nennt? Die Lautsprecher der Wahrheit! Die Auratones beschönigen nichts [...] Wahrscheinlich werden 80 Prozent des Mixes auf den Auratones erledigt und dann mache ich zuletzt noch ein oder zwei Mal ein endgültiges Abhören auf den großen Lautsprechern.“³

Auch Echo-Gewinner Patrik Majer, Produzent von Wir sind Helden und Rosenstolz, schwört auf die Auratones:

„Mit den Auratones arbeite ich zu 90 Prozent. Es gibt kaum etwas Besseres um Tuning und Timing eines Mixes zu beurteilen. Diese kleinen Boxen sind so gnadenlos, dass man bei geringen Lautstärken wunderbar damit arbeiten kann.“⁴

Audio Engineer und Fachbuch-Autor Andreas Friesecke macht sie oft zum Thema seiner Publikationen. Er ist ebenfalls von den klanglichen Eigenschaften der Auratones überzeugt und empfiehlt sie als die Referenz in Sachen Lokalisationsschärfe und Tiefenstaffelung von Phantomschallquellen.⁵

Die Auratone 5C waren kleine, beinahe würfelförmige, Breitbandlautsprecher mit einer Kantenlänge von gerade mal 16cm. Neben dem Auratone 5C erschienen nur wenige

¹ Vgl. Auratone LLC, Auratone, 22.05.2014

² Vgl. PR Newell u.a.: The Yamaha NS10M: Twenty Years a Reference Monitor, 2001, S. 3

³ Swedien, Bruce: Mixing Secrets. Perfektes Mischen im Homestudio, Heidelberg 2009, S. 50

⁴ Majer, Patrik: Report: Interview mit Patrik Majer. In Sound & Recording 9, 2006, S. 42

⁵ Vgl. Friesecke, Andreas: Brüllwürfel Reloaded, Recording Magazin 4, 2012, S. 45

Konkurrenzprodukte auf den Markt. Somit blieben sie, trotz ihres Erfolges, nur ein Nischenprodukt. Die kleine Sparte von Studiobreitbändern konnte mit neuen Modellen erst in den letzten Jahren wieder neues Interesse wecken. Heute gelten sie eher als ein Worst Case und werden meist im Mono-Betrieb als letztes Abhörkontrollwerkzeug eingesetzt. Die kleinen Breitbandsysteme werden werbewirksam als „Referenz Studio Monitor“ verkauft und sind wieder öfters in Tonregien aufzufinden.¹

Bei den Lobpreisungen des doch recht simplen Lautsprecherkonzepts stellt sich die Frage, woher der Kult um diese Lautsprecher stammt. Des Weiteren kommt die Überlegung auf, wieso diesem Konzept in der Branche so wenig Beachtung geschenkt wird. Die aufgeführten Aussagen von namenhaften Produzenten und der vom Marketing suggerierte Einsatz als Studioreferenz sind anzuzweifeln. In dieser Bachelorarbeit wird die Tauglichkeit von Breitbandsystemen als Studioregielautsprecher überprüft. Es soll untersucht werden, ob auf diesen Systemen der Hauptanteil einer Mischung durchgeführt werden kann. Dabei sollen nicht nur auf dem Markt befindliche Modelle untersucht werden, sondern das grundlegende Konzept.

Bis heute sind zwei Formen von Breitbändern für Abhörzwecke erhältlich. Die meisten Breitbandmonitore orientieren sich an dem Design und Klang der alten Auratone Lautsprecher. Neben diesen Modellen gibt es noch die kleineren und robusten Abhörlautsprecher für den Einsatz im Übertragungswagen. Beide Konzepte sind geschlossene Systeme, die sich nur in Gehäuseform und -material unterscheiden.

Da die meisten Studiobreitbänder einen gezielt eingeschränkten Frequenzgang aufweisen, wurde mit einem konstruierten Paar Testboxen ein mögliches Verbesserungspotential ausgelotet. Dadurch konnte geprüft werden, ob mit modernen und hochwertigen Breitbandchassis, Regielautsprecher gebaut werden können, die professionellen Studioanforderungen gerecht werden. Diese Test-Box wurde mit jeweils einem Vertreter der beiden Breitband-Varianten und einer Zweiwege-Box, aus dem gleichen Preissegment, eingemessen. Die Messwerte werden nun anhand gültiger Standards für Studioregielautsprecher ausgewertet. Da der Klang einer Box und ihre Tauglichkeit für Mischprozesse nicht nur anhand von Messwerten beurteilt werden kann, wurde ein Hör- und Praxistest für alle untersuchten Monitore durchgeführt. Hierbei wurden die Breitbandsysteme, neben günstigen Zweiwege-Lautsprechern, mit hochpreisigen Koaxialen Regielautsprechern verglichen.

¹ MUSIC Group IP Ltd., Behritone C5A, so auch Avantone Pro, MixCube Monitors, 11.06.2014

2 Breitbandsysteme – theoretische Grundlagen

Breitbandlautsprecher sind Lautsprecher, die einen breiten Frequenzbereich mit nur einem Chassis abbilden sollen. Hoch- und Tieftöner werden regulär nicht mit Breitband-Chassis kombiniert. Breitbandlautsprecher werden meistens in Geräten verbaut, in dem mit wenig Volumen und Aufwand ein ausgewogenes Klangbild erzeugt werden soll. Fernseher, tragbare Radiorecorder und Autoradios sind hier die bekanntesten Einsatzgebiete. Besonders im DIY-Hi-Fi-Bereich (Do it Yourself/Selbstbau) sind sie sehr beliebt, da hier mit wenig Aufwand bereits gute Ergebnisse erzielt werden können. Dies hindert jedoch ambitionierte Lautsprecherkonstrukteure nicht daran, Breitbandchassis in aufwendige Transmission-Line- oder Hornlautsprecher-Gehäuse zu verbauen.

Die Breitbandchassis unterscheiden sich auf den ersten Blick kaum von normalen Mittelton-Konuslautsprechern (Abb. 1). Im Prinzip sind die Chassis auch nur Konus Lautsprecher mit leicht veränderten Eigenschaften.

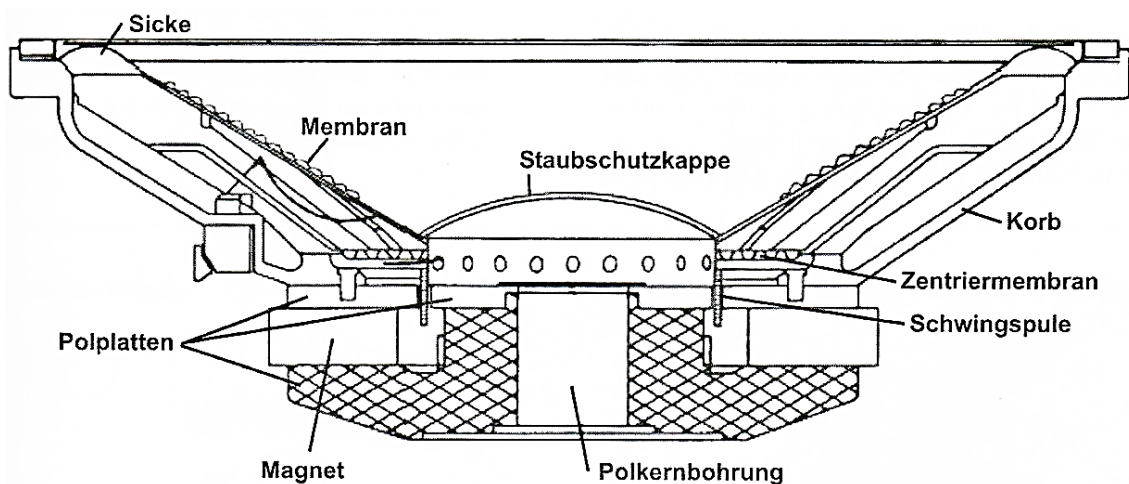
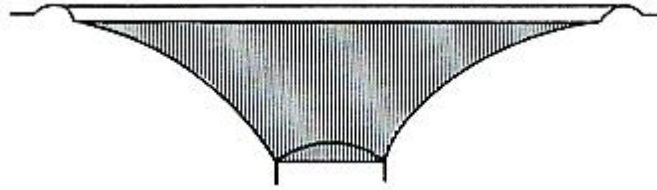


Abbildung 1: **Schnittzeichnung eines Konus-Lautsprechers** (Friesecke 2007, S. 439)

Die Sicke der Treiber ist relativ steif und ermöglicht einen geringeren Hub als bei normalen Chassis. Die hart und straff aufgehängte Membran von einem Breitbandchassis wird zum Rand hin dünner und besitzt die spezielle Formgebung einer Nawi-Membran (nicht aufwickelbare Membran). Dadurch wird das Schwing- und Abstrahlverhalten der Membran bei höheren Frequenzen verbessert und der Einsatz von Konus-Lautsprechern als Breitbänder ermöglicht. Bei Nawi-Membran handelt es sich um eine Membran mit hyperbolischen Querschnitt, die sich nicht zu einer ebenen Fläche aufrollen und formen lässt (Abb. 2).

Abbildung 2: **Nawi-Membran** (Hausdorf 2013, S. 29)

Die Formgebung und straffe Aufhängung der Membran ist bei Breitband-Chassis auch nötig, denn hiermit wird versucht, die bekannten Nachteile von den Breitbändern zu kompensieren.

2.1 Nachteile

Partialschwingungen (Membranresonanzen):

Im Normalfall bewegt sich eine Lautsprecher-Membran kolbenförmig. Das heißt, ihre Auslenkung erfolgt in sich starr, vor und zurück. In der Praxis ist dieses Verhalten leider nicht immer zutreffend. Abhängig vom Durchmesser bewegen sich die Membranen bis zu einer bestimmten Frequenz durchaus als Ganzes. Wegen des breiten wiederzugebenden Frequenzspektrums, sind besonders Breitbandsysteme von Partialschwingungen betroffen. Schließlich sollen Breitbänder neben den tiefen und mittleren Frequenzen auch Höhen wiedergeben.

In dem Membranmaterial pflanzen sich von der Antriebs- bzw. Schwingspule ausgehend Wellen zum Rand hin fort. Am Rand werden diese Wellen reflektiert, überlagern sich mit der hinlaufenden Welle und können so stehende Wellen (Partial- oder Eigenschwingungen) im Membrankörper bilden. Diese haben zur Folge, dass sich ein Bereich der Membran nach vorne und gleichzeitig ein anderer Bereich nach hinten bewegt. Diese Teilbereiche können somit auch gegenphasige Schwingungen erzeugen.

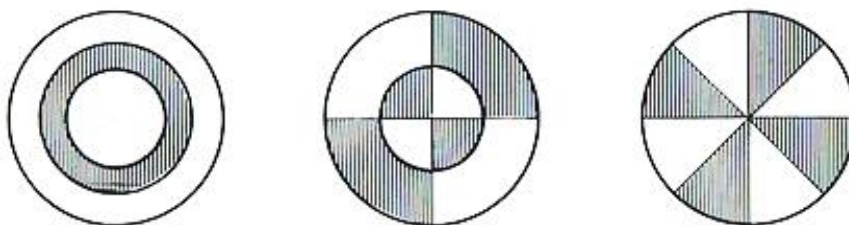
Abbildung 3: **Zonen entgegengesetzter Membranbewegungen** (Hausdorf 2013, S. 51)

Abb. 3 zeigt beispielhaft Zonen unterschiedlicher Membranbewegungen. Das Resultat ist eine frequenzabhängige Auslöschung der Schallabstrahlung und so entsteht ein zerklüfteter Frequenzgang. Liegt die Wellenlänge, der in der Membran fortschreitenden

Welle, in der Größenordnung der Membranabmessung, ist diese Erscheinung verstärkt zu beobachten. Aus diesem Grund werden besonders die hohen Frequenzen von Partialschwingungen beeinflusst.

Eine Abhilfe bietet eine durch Material oder Form möglichst leichte und steife Membran oder eine hohe innere Dämpfung des Membranmaterials. Eine steifere Membran verschiebt die Resonanz in höhere Frequenzen, verstärkt jedoch auch ihre Ausprägung. Diese Maßnahmen können kombiniert werden, indem ein steifes Membrangebilde mit einem geeigneten Material hoher Dämpfung beschichtet wird. Eine Lautsprecher-Membran besteht entweder aus langfaserigem Papier, Kunststoff (Polypropylen, Kevlar), Hartschaum (Polystyrol) oder Leichtmetallen wie Aluminium und Titan. Aufgrund konsequenter Weiterentwicklung der Papiermembran, kann sie sich weiterhin gegenüber modernen Materialien behaupten. Eine Membran aus Polypropylen ist zwar schwerer als Papier, hat aber den Vorteil der größeren inneren Dämpfung, die Partialschwingungen verhindert. Eine mit Kunststoff beschichtete Papiermembran stellt hier einen guten Kompromiss dar. Bei Breitbandsystemen wird durch die Formgebung der Nawi-Membran deren Steifigkeit nochmals erhöht, bei ebenfalls geringerer Masse.

Mit diesen Maßnahmen lassen sich Membranresonanzen zwar reduzieren, vermeiden lassen sie sich jedoch nicht. Deshalb sind die Frequenzgänge von Breitbändern in den Höhen oft sehr wellig oder weisen ausgeprägte Pegelspitzen auf.

Bündelung hoher Frequenzen:

Je größer ein Lautsprecher ist, desto mehr Schalldruck kann er zu tiefen Frequenzen hin produzieren. Leider strahlt er dann bei größer werdender Membranfläche zu hohen Frequenzen hin immer gerichteter ab. Das betrifft die Frequenzen, deren Wellenlänge kleiner als der Membrandurchmesser des abstrahlenden Chassis ist. So ändert sich die Klangfarbe des Lautsprechers in Abhängigkeit zur Ausrichtung zum Abhörplatz. Ist die Bündelung der hohen Frequenzen zu stark, ist bereits eine Abweichung von ein bis zwei Zentimetern vom idealen Abhörpunkt ausreichend, um starke Klangeinbußen zur Folge zu haben. Der ideale Abhörpunkt, der sogenannte Sweetspot, im Stereodreieck ist also sehr klein. So besitzen Breitbandlautsprecher mit kleineren Membranen (3-5 Zoll) einen größeren Sweetspot, da sie hohe Frequenzen weniger gerichtet abstrahlen als Breitbänder mit größeren Membranen (6-8 Zoll). Das problematische Abstrahlverhalten eines Breitband-Lautsprechers ist auf einem Sonogramm (Abb. 4) gut zu erkennen. Der horizontale Abstrahlwinkel ist hier ab etwa 3 kHz sehr stark eingeschränkt. Es handelt sich hierbei um einen der größeren Vertreter von Breitband-Lautsprechern.

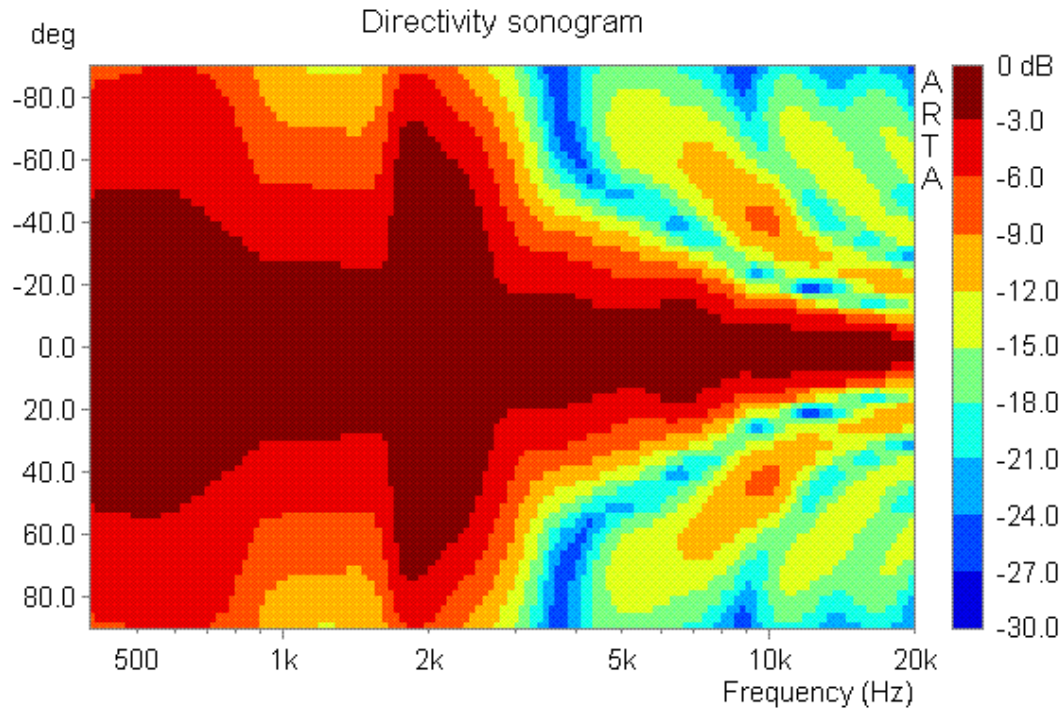


Abbildung 4: **Sonogramm eines Breitbänders** (K&K GmbH, Klang und Ton - 25 Jubiläum, 2011)

Bei Mehrwegesystemen treten Bündelungen von hohen Frequenzen ebenfalls auf, trotzdem sind sie bei Breitbändern wesentlich stärker ausgeprägt. Besonders große Breitbänder bündeln den Schall bereits im Mitteltonbereich. Diese Eigenschaft kann im Nahfeld auch vom Vorteil sein, da der Raumhall weniger angeregt wird. Leider geschieht dies nicht im gesamten Frequenzband, was zu einer Fehleinschätzung von Rauminhalten im Klangbild führen kann.

Frequenzmodulationseffekte (Dopplereffekt):

Durch ihre bessere Richtwirkung werden meist kleine Breitbandssysteme eingesetzt. Ist die Membran kleiner bemessen, verbessert sich zwar das Abstrahlverhalten in den Höhen, aber bei tiefen Frequenzen wird diese sehr stark ausgelenkt. Schwingt die Membran zugleich in höchsten und tiefsten Tönen, entsteht durch diese Membranbewegung ein klangverfälschender Frequenzmodulationseffekt. Im Takt der tiefen Frequenzen wird die Membran stark vor und zurück bewegt. Von der gleichen Membran werden jedoch zur selben Zeit auch mittlere und hohe Frequenzen abgestrahlt. Bei der tieffrequenten Membranauslenkung bewegt sich die Schallquelle der höheren Frequenzen zum Hörer hin und dann wieder vom Hörer weg. Dadurch entsteht ein Dopplereffekt, der beim Heraustreten der Membran die Schallquelle höher und beim Zurückschnellen tiefer erscheinen lässt. Durch die tiefen Frequenzen werden somit die mittleren und hohen Frequenzen frequenzmoduliert. Der Dopplereffekt ist umso deutlicher hörbar, je größer

die Membranbewegung ist. Unter diesem Aspekt sollte zumindest immer der Frequenzbereich, der spürbare Membranauslenkungen verursacht, von einem Mittel- oder Hochtonsystem ferngehalten werden. Dieser Effekt lässt sich nur durch geringere Membranbewegungen eindämmen. Um tiefere Frequenzen bei geringerer Membranbewegung zu erzeugen, ist entweder eine größere Membranfläche erforderlich oder ein geringerer Pegel im Bassbereich.

Eingeschränkter Frequenzgang:

Um die Richtwirkung zu verbessern und Modulationseffekte zu vermindern, sind die Membranmasse und ihr Durchmesser relativ gering und ihre Aufhängung sehr straff. Durch die harte Aufhängung und den damit verbundenen geringen Membranhub, fehlt die nötige Membranauslenkung für die Wiedergabe tiefer Frequenzen. Durch die vergleichsweise hohe Masse der Membran (vgl. Hochtöner) ist auch die Wiedergabe hoher Frequenzen nur eingeschränkt möglich.

2.2 Vorteile

Einwegelautsprecher sind die einfachste Lautsprecherkonstruktion die gebaut werden kann. Da das Frequenzspektrum nicht auf mehrere Treiber aufgeteilt werden muss, ist der Einsatz von Frequenzweichen obsolet. Abhängig von Gehäusekonstruktion und eingesetztem Treiber, sind jedoch Entzerrschaltungen wie Sperrkreise zur Frequenzlinearisierung notwendig.

Breitbänder funktionieren in beinahe jeder Gehäusekonstruktion. So können sie in kleinen Bassreflexboxen, ebenso wie in aufwendigen Horn-Konstruktionen und komplizierten Transmissionline-Gehäusen (TML) einen ausgewogenen Klang erzeugen. Einige Breitbandchassis-Modelle sollen in einer entsprechend dimensionierten Schallwand sogar komplett ohne frequenzlinearisierenden Entzerrschaltungen betrieben werden können.

Im Gegensatz zu Mehrwegesystemen gibt es bei Breitband-Monitoren keine unterschiedlich positionierten Schallquellen vom Hoch- und Tieftöner. Mögliche Laufzeitunterschiede von mehreren auf der Schallwand positionierten Chassis, sind bei Einwegelautsprechern kein Thema. Breitbänder sind Punktstrahler und haben somit nur ein akustisches Zentrum für die Schallabstrahlung. Interferenzen durch die Anordnung mehrerer Chassis können also nicht entstehen. Interferenzen sind Frequenzüberhöhungen oder -auslöschungen, die bei der Überlagerung zweier Wellen entstehen.

Breitbandssysteme sind minimalphasig, d.h. ihr Phasengang hat einen ähnlich linearen Verlauf wie ihr Frequenzgang. Ohne verbaute Frequenzweichen treten auch keine Phasenprobleme auf. Frequenzweichen teilen die Tonfrequenzen in verschiedene Bereiche auf. Dadurch wird jedem Lautsprecher-Chassis der Frequenzbereich zugeteilt in dem er am optimalsten arbeitet. Phasenfehler sind Zeitfehler, die innerhalb eines Übertragungskanals auftreten. Im Bereich zwischen 500Hz und 8kHz sind Zeitfehler besonders kritisch. Fast alle Zweiwege-Lautsprecher weisen Zeitfehler auf, da deren Grenzfrequenz der Weiche innerhalb dieses Bereiches liegt. Bei Mehrwege-Systemen strahlen Hoch- und Tieftöner an ihrer Trennfrequenz das gleiche Signal mit gleichem Pegel ab. Durch Phasenverschiebungen in der Frequenzweiche kann es passieren, dass die einzelnen Wege nicht zeitgleich abstrahlen. An der Übertragungsfrequenz strahlt der Tieftöner leicht verzögert zum Hochtöner ab. Hierbei treffen bestimmte Frequenzen früher und später am Abhörpunkt ein. Die Verzögerungszeit beträgt in der Praxis zwischen 20µs und 200µs.¹

Diese Phasenfehler haben einen Einfluss auf den Einschwingvorgang und verändern somit die Erkennbarkeit und Lokalisation des Signals. Die Phantomschallquelle zwischen den Lautsprechern wird nicht scharf und deutlich abgebildet. Auf Grund der Lokalisationsmechanismen des Gehirns, hat dies eine sehr flache Abbildung von Phantomschallquellen im Stereobild zur Folge. Weiterhin ist auch die räumliche Tiefe innerhalb einer Mischung nicht zu hören. Bei Mehrwegesystemen ist ein Zeitabgleich (Time Alignment) nötig, um die einzelnen Wege aufeinander abzustimmen. Dies kann mechanisch durch einen Versatz der einzelnen Treiber im Lautsprechergehäuse erfolgen oder elektronisch mit Hilfe eines Delays realisiert werden.

Dank dieser Eigenschaften können Einwegelautsprecher als Referenz in Sachen Lokalisationsschärfe und Tiefenstaffelung von Phantomschallquellen betrachtet werden. Sie bieten eine nahezu perfekte Phantomschallquellenabbildung, bei der die Lautsprecher nicht mehr als Schallquelle wahrgenommen werden (Abb. 5). Jedes Element kann präzise im Stereopanorama lokalisiert werden (Abb. 6). Neben ihrer besseren Räumlichkeit und Abbildungsschärfe, haben Breitbandssysteme außerdem ein ausgezeichnetes Impulsverhalten.

¹ Vgl. Friesecke, Andreas: Studio Akustik. Konzepte für besseren Klang Bergkirchen 2013, S. 131.

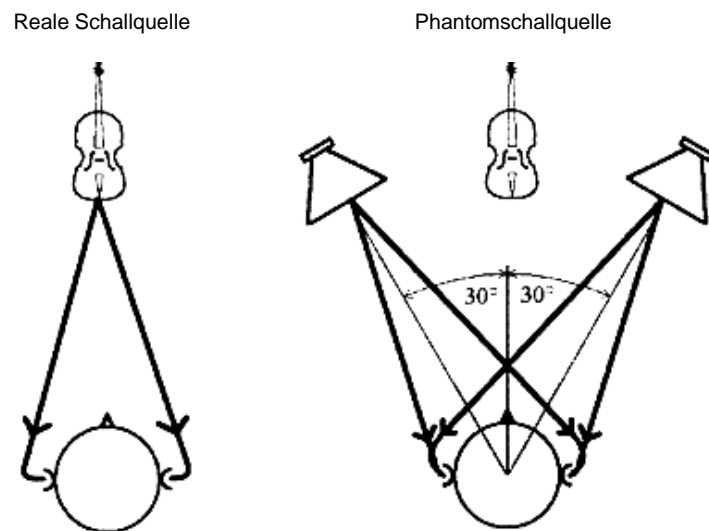


Abbildung 5: **Phantomschallquelle** (zz-netz.de; HIFI-Selbstbau, 2009)

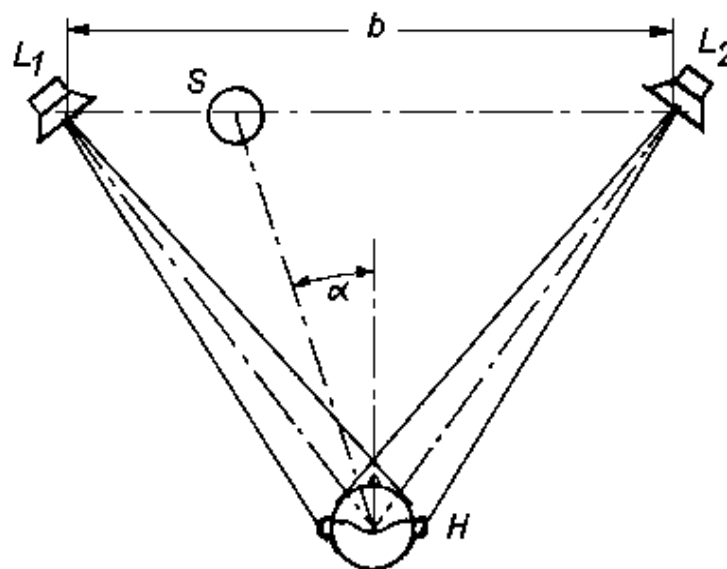


Abbildung 6: **Lokalisation** (TMR Elektronik GmbH; Summenlokalisierungseffekt, 2013)

3 Breitbandssysteme im Studiosegment

Die Auratone Soundcubes werden heute nur noch im kleinen Rahmen in den USA gefertigt. Dem Design und Konzept blieb das kleine Familienunternehmen in den letzten Jahrzehnten treu. Außerhalb der Staaten sind die originalen Auratone jedoch nur in gebrauchter Form verfügbar. Ein Vertrieb in Europa gibt es nicht.

Ende der 1970er Jahre veröffentlichte die Firma Fostex ihre ersten professionellen Lautsprecher. Mit dabei war auch der Fostex 6301B, das wohl erste Konkurrenzprodukt zu den Auratone Breitbändern. 1988 folgte der M201 von der Firma Klein & Hummel. Beide Modelle unterschieden sich jedoch vom klassischen Gehäusedesign der Auratone. Mit den AKG LSM 50 und den TOA 22-ME-AV gab es noch zwei weitere Auratone-Nachbauten, welche heute nicht mehr verfügbar sind.

In den letzten Jahren erschienen weitere Alternativen und das Angebot am Markt ist heute wesentlich abwechslungsreicher. Avant-Electronics sorgte 2008 mit den Avantone Soundcubes für einen Relaunch von Studio Breitbandmonitoren im traditionellen Auratone-Design. Nach dem Avantone kamen weitere Nachbauten von Behringer und Reftone. Der Fostex 6301B wird weiterhin nahezu unverändert angeboten. Die M201 wird aktuell mit dem M52 unter der Firma Neumann vertrieben.

Bei Breitbändern für Abhörzwecke handelt es sich in der Regel um eine geschlossene Box mit einem 3-5 Zoll großen Treiber darin. Die verwendeten Gehäusekonstruktionen lassen sich in zwei Varianten einteilen.

Die Breitbandmonitore von Fostex und Neumann haben ein Aluminiumgehäuse mit ca. 18cm Höhe, knapp 12cm Breite und gerade mal 11cm Tiefe. Beide werden aktiv betrieben – haben also einen integrierten Verstärker. Dank ihrer robusten und kompakten Bauweise sind sie im mobilen Einsatz, wie z.B. in Ü-Wagen, sehr beliebt.

Die andere Gehäusevariante orientiert sich am klassischen Design der Auratone Soundcubes. Die Gehäuse bestehen aus mitteldichten Faserplatten (MDF) und sind nahezu würfelförmig mit einer Kantenlänge von 14-20cm. Die Gehäusefront, bzw. die Schallwand ist quadratisch und die Chassis sind genau mittig positioniert. Behringers Behritone gibt es ebenfalls nur in aktiver Ausführung. Die Avantone sind aktiv und passiv verfügbar und die Reftone werden ausschließlich passiv mit externem Verstärker betrieben.

Alle Studiobreitbänder haben ein sehr geringes Gehäusevolumen von knapp 2-3 Litern. So bremst die Luft im Gehäuse die Vorwärts- und Rückwärtsbewegung der Membran. Dadurch wirkt ein kleines Gehäuse wie eine steifere Membranaufhängung. Je kleiner

das Luftvolumen eines geschlossenen Gehäuses ist, desto schwächer ist in der Regel die Tiefbasswiedergabe. Bei den verbauten Breitbandchassis ist die Aufhängung der Membran auch noch besonders hart und straff. Dadurch ist die relativ kleine Membran in der Lage, den verbleibenden Frequenzbereich in höherer Lautstärke und ohne störenden Frequenzmodulationseffekt zu reproduzieren. Zusätzlich wird durch die knapp bemessene Membran die Höhenbündelung verringert.

Alle kleinen Breitbandmonitore haben somit eine Gemeinsamkeit: Ihr Frequenzgang ist vor allem im Bassbereich sehr stark eingeschränkt. So erzeugen die meisten Modelle erst oberhalb von 200 Hz einen nennenswerten Schalldruck.

Die meisten Studiobreitbandssysteme am Markt verfügen über keine zusätzliche Elektronik zur Frequenzlinearisierung. Lediglich in der M52 wird der Frequenzgang mit einer Filterschaltung begradigt (Anhang D4).¹

Es ist offensichtlich, dass im Studiosegment ausschließlich kleine Breitbandmonitore verkauft werden. Durch die geringe Größe soll eine zu starke Bündelung in den Höhen reduziert werden. Die Wiedergabe von tiefen Frequenzen wird durch straffe Membranaufhängungen und geschlossene Gehäuse unterbunden. Damit sollen Modulationseffekte reduziert oder möglichst vermieden werden. Durch diese Maßnahmen sind nur eingeschränkte Frequenz-Bandbreiten bei den Studiobreitbändern zu erwarten.

Mit diesen Eigenschaften ist die mögliche Konstruktion einer vollwertigen Regieabhöre beinahe auszuschließen. Breitbandige Frequenzgänge sind somit nur mit Einschränkungen zu realisieren. Tiefe Frequenzen werden entweder durch extreme Bündelung in den Höhen oder durch störende Modulationseffekte erkaufte. Hinzu kommen die Membranresonanzen, die für einen welligen Verlauf in den Höhen verantwortlich sind.

Mit dem gebauten Breitband-Abhörsystem wird dennoch versucht, ein breiteres Frequenzspektrum zu erzeugen. Dabei sollen Bündelungen und Modulationsverzerrungen möglichst gering ausfallen.

Für eine subjektive und vor allem objektive Einschätzung der verschiedenen Breitbandsysteme sind Messungen und Referenzen notwendig. Bewertungsmaßstäbe für die zu testenden Systeme, werden im folgenden Kapitel beschrieben.

¹ Georg Neumann GmbH, M 52 - Aktiver Control-Monitor, technische Daten, 22.05.2014

4 Normen und Standards für Studio-Regie-Lautsprecher

Bevor auf die Messungen und die Auswertung der Messwerte eingegangen werden kann, wird aufgezeigt, welche allgemeinen Anforderungen an Regielautsprecher erhoben werden.

Bei Studio-Abhöreinrichtungen wird besonders auf den Frequenzgang, die Richtcharakteristik und den nichtlinearen Verzerrungen geachtet. Neben den komplexen messbaren und nicht messbaren Eigenschaften, ist stets auch eine subjektive Bewertung von Bedeutung. In internationalen Empfehlungen sind die Anforderungen an Studiolumlautsprecher erfasst. Zur Bewertung der gesamten Abhörsituation genügt es allerdings nicht, die Eigenschaften der Lautsprecher zu definieren. Die geometrischen und akustischen Eigenschaften des Abhörzimmers und die Aufstellung der Lautsprecher wurden ebenso festgelegt.¹

Die Anforderungen für professionellen Studioabhörsituationen sind in internationalen Empfehlungen der EBU [Tech3276] und ITU-R [BS.1116] niedergelegt. In weiteren nationalen und internationalen Richtlinien, wie [SSF1.1] oder [AES1001], wird auf diese Empfehlungen verwiesen. Diese Schriften können somit als ein weltweiter Standard für hochwertige Tonwiedergabe in Studios angesehen werden.

Der empfohlene Abhörstandard bildet die Voraussetzung für ein optimales Arbeiten im Tonstudio. Die auditiven Kontrollen bei Tonmischungen und -aufzeichnungen, sowie die Bewertung der Tonqualität von Produktionen sollen so vereinfacht und verbessert werden. In diesen Schriften wird die Gesamtheit der Hörbedingungen beschrieben. Allerdings werden in dieser Arbeit nur die empfohlenen Standards für Regielautsprecher berücksichtigt. Die geometrischen und akustischen Eigenschaften des Abhörzimmers, die Anordnung der Lautsprecher im Abhörzimmer, sowie der Hörort bzw. die Hörzone für den ausgewählten Hörplatz, sind für die Einschätzung von Breitbandsystemen weniger relevant.²

¹ Vgl. Dickreiter, Michael: Handbuch der Tonstudientechnik. Band1, München 2008, S. 176.

² Vgl. Dickreiter, Michael: Handbuch der Tonstudientechnik. Band2, München 2008, S. 1157ff

Die aufgeführten Werte sind unter Freifeldbedingungen mit einem Meter Abstand zu messen. Die folgenden Anforderungen werden für die Messung und dem Vergleich der Lautsprechersysteme berücksichtigt:

Der Amplitudenfrequenzgang wird auf der Hauptachse bei 0° und einer 1/3-Oktavglättung gemessen. Der Frequenzgang eines Regielautsprechers sollte im Frequenzbereich von 40 Hz bis 16 kHz einen Toleranzbereich von 4 dB nicht überschreiten.

Bei einem Winkel von $\pm 10^\circ$ horizontal und vertikal zur Hauptachse ist nur eine Abweichung von ± 3 dB zum Amplitudenfrequenzgang an der Hauptachse im Toleranzbereich. Bei einem Winkel von $\pm 30^\circ$ auf der horizontalen Ebene ist nur eine Abweichung von ± 4 dB zum Amplitudenfrequenzgang an der Hauptachse tolerierbar. Größere frequenzabhängige Variationen sind besonders im Frequenzbereich oberhalb der 500 Hz zu vermeiden.

Bei der Nichtlinearen Verzerrung wird bei einem Mindestschalldruckpegel von 90 dB (SPL) in 1m Entfernung gemessen. Dabei soll der Klirr im Frequenzbereich von 250 Hz bis 16 kHz die 1% nicht überschreiten. Im Frequenzbereich von 40 Hz bis 250 Hz sind maximal 3% Klirr tolerierbar. In der allgemeinen Fachliteratur beträgt die Abgrenzung dieser Frequenzbereiche 100Hz.

Der Maximale Schalldruckpegel (SPL) sollte bei einem Abstand von 1m mindestens 108 dB betragen.¹

Nach DIN 45511 und der EN 60094-1 gelten ähnliche Vorgaben für Studiogeräte. Hier beträgt die Bandbreite für einen 3dB Toleranzbereich jedoch nur 80Hz bis 8kHz.²

Neben diesen Daten gibt es weitere Vorgaben, die für die Bewertung von Regielautsprechern relevant sein können. Für diese Arbeit und der Untersuchung von Breitbandsystemen sind die aufgezählten Punkte ausreichend.

¹ EBU [Tech. 3276] – 2nd edition, 1998, S. 14, so auch ITU-R [BS.1116-1] 1994-1997, S. 8f.

² DIN EN 60094-1. 1994, S. 9.

5 DIY – Testbox

Der gebaute Breitbandlautsprecher soll sich am Konzept und dem klassischen Design der Auratone orientieren. Wie bei den Modellen von Avant und Behringer wird ein 5 Zoll Breitbandchassis verbaut. Das Chassis soll nach Möglichkeit ohne frequenzbeeinflussende Elektronik betrieben werden können.

Der Tang Band W5-1611SA scheint für ein modernes Pendant eines Studiobreitbänders bestens geeignet zu sein. Die verwendete Polypropylenmembran in Nawi-Form soll für einen Breitbänder in den Höhen weniger bündeln. Der verbaute Phase-Plug sorgt somit für ein besseres Abstrahlverhalten. Laut Datenblatt wird dem Chassis ein breitbandiges Frequenzspektrum bescheinigt. Der filigrane Korb und der kleine Neodymmagnet haben praktischerweise nur wenig Einfluss auf das Nettovolumen des geplanten Gehäuses. Mit diesem Chassis erhofft sich der Verfasser dieser Arbeit Breitbandqualitäten mit einem breiteren Frequenzgang und besserem Abstrahlverhalten zu kombinieren.

Wie bei den anderen Breitbandmonitoren soll auch dieses Chassis in ein geschlossenes Gehäuse verbaut werden. Horn- und TML-Gehäuse haben eher unpraktische Dimensionen. Mit einer Bassreflexbox könnte die untere Grenzfrequenz auch mit weniger Volumen weiter abgesenkt werden. Dennoch wird, für ein besseres Impulsverhalten und einer saubereren Basswiedergabe, auf den erweiterten Frequenzgang verzichtet.

In Bassreflexlautsprechern befindet sich eine Öffnung, welche durch die Lautsprechermembran das gesamte Gehäuse zum Resonieren anregt. Durch diese Resonanzen sollen tiefe Frequenzen betont werden. Besonders bei kleinen Gehäusen und ihren ebenso kleinen Membranen, soll damit der Performancebereich erweitert werden. Somit kann auch bei einem kleinen Lautsprechergehäuse ein kräftiger und voluminöser Klang erzeugt werden. Das Prinzip funktioniert natürlich auch bei großen Gehäusen und Membranen.

Die untere Grenzfrequenz (Resonanzfrequenz) des Lautsprechers wird mit einer Reflexöffnung weiter herabgesetzt, ohne das Volumen vergrößern zu müssen. Allerdings ist die Flankensteilheit des Abfalls unterhalb dieser Frequenz viel steiler als bei einer geschlossenen Box. So werden unterhalb der Grenzfrequenz kaum noch Frequenzen wiedergegeben. Der Pegelabfall beginnt bei geschlossenen Gehäusen bereits bei einer höheren Frequenz. Allerdings ist dessen Flankensteilheit weniger steil und somit können unterhalb der Grenzfrequenz noch mehr tiefere Frequenzen (wenn auch leiser) wahrgenommen werden, als bei Bassreflexgehäusen. Die Reflexöffnungen haben auch einen negativen Einfluss auf die Impulswiedergabe. So werden flüchtigen perkussiven Anschlaggeräuschen (Transienten) kurze Resonanzen hinzugefügt. Dadurch erscheinen sie lauter aber weniger druckvoll. Bei abrupt stoppenden Klängen tritt ein ähnlicher Effekt

auf. Denn hier maskiert die zusätzliche Resonanz das tatsächliche Ausklingverhalten des Klangs. Außerdem werden durch die Resonanzen, die Grundfrequenzen tiefer Bass-töne übertönt. Dadurch lassen sich mehrere verschiedene Bassfrequenzen nur schwer voneinander unterscheiden. Der Bass ist somit wenig transparent und klingt undefiniert.

Natürlich gibt es auch Bassreflexlautsprecher, die mit einem optimierten inneren Gehäusedesign kaum bis keine dieser Defizite aufweisen. Allerdings sind solche Lautsprecher meist nur in hochpreisigen Segmenten anzufinden. Ebenso kann auch eine falsch abgestimmte geschlossene Box einen dröhnenden undifferenzierten Klang wiedergeben.

Dem geschlossenen Gehäusedesign liegt die Idee einer unendlich großen Schallwand zugrunde, denn dadurch wird der akustische Kurzschluss tiefer Frequenzen vermieden. Beim akustischen Kurzschluss wird bei einer schwingenden Membran die Luft auf der Vorder- und Rückseite jeweils verdichtet und entspannt. So herrscht ein Phasenunterschied von 180 Grad. Sind beide Seiten nicht voneinander isoliert, schwingt die Membran bei tiefen Frequenzen so langsam, dass die Luft die Druckunterschiede ausgleichen kann und Bässe nicht mehr hörbar sind (Abb. 7).

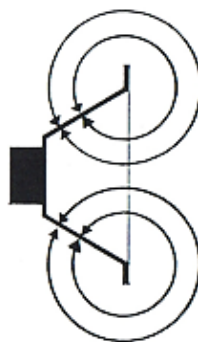


Abbildung 7: **Der akustische Kurzschluss – schematisch** (Hausdorf 2013, S. 63)

Die im Gehäuse eingeschlossene Luft hat allerdings auch eine Federwirkung. Je größer das gewählte Volumen der Box, desto weicher ist die Feder. Die Membranbewegung führt zu einem variierenden Gehäusevolumen und somit zu einer Variation des Luftdrucks im Gehäuse. Diese Luftdruckänderung übt eine Rückstellkraft auf die Membran aus. So bremst die Luft im kleinen Gehäuse die Vorwärts- und Rückwärtsbewegung der Membran. Mit dem Luftvolumen des geschlossenen Gehäuses lässt sich somit die Einspannung der Membran ver härten. So lassen sich unerwünschte Modulationseffekte durch größere Membranauslenkungen vermeiden. Der Nachteil ist, dass sich die Eigenresonanzfrequenz des eingebauten Lautsprechers gegenüber der Freiluftresonanzfrequenz erhöht. Die untere Grenzfrequenz wird also mit kleineren Gehäusen erhöht. Ist das Gehäuse jedoch zu knapp bemessen, wirkt sich der Gegendruck auf die Membran negativ auf das Ein- und Ausschwingverhalten des Lautsprechers aus.

Im Grunde ist ein Lautsprecherchassis ein Hochpass-Filter zweiter Ordnung und der Einbau in eine geschlossene Lautsprecherbox verändert dessen Parameter, aber nicht seine Ordnung. Die Güte und Grenzfrequenz des Filters ist somit vom Volumen der Box abhängig. Mit den Q-Faktoren des Lautsprecherchassis lässt sich die Güte für das jeweilige Boxenvolumen bestimmen. Die Güte des zusammengebauten Systems wird mit dem Q_{TC} definiert.

5.1 Gehäusevolumen und Resonanzfrequenz

Bei der Kombination von Federkräften und den Chassis-Parametern muss in der geschlossenen Box ein sinnvoller Kompromiss zwischen Impulsverhalten und Basswiedergabe gefunden werden. Der Q_{TC} -Wert hilft hierbei die passende Abstimmung zu finden.

Die sogenannte Butterworth-Abstimmung ist ein guter Kompromiss aus amplitudenmäßig starker Tiefenwiedergabe und präzisiertem Einschwingverhalten. Sie hat die linearste Wiedergabe über einen weiten Frequenzbereich. Die Butterworth-Abstimmung hat einen Q_{TC} von 0,7 bis 0,71. Wird hier, bei größeren Gehäusevolumen, ein kleinerer Wert errechnet, verringert sich die Basslautstärke, mit jedoch noch besserem Einschwingverhalten. Eine Box mit einem Q_{TC} von 0,5 hat demzufolge ein gutes Impulsverhalten, mit schon früh einsetzendem Pegelabfall im Bass. Wird der Q_{TC} von 0,71 überschritten, hat die Box eine stärker ausgeprägte, aber verwaschene Basswiedergabe. Eine Box mit einem Q_{TC} von 1,0 weist eine Pegelüberhöhung im Bassbereich auf. Durch das schlechte Impulsverhalten klingt sie sehr dumpf und dröhnend.¹

In Abb. 8 wird die Auswirkung der Q-Werte auf den Amplitudenfrequenzgang dargestellt. Mit den Q-Werten lassen sich Frequenzverläufe im Bereich der Resonanzfrequenz eines zusammengebauten Lautsprechers bestimmen.

¹ Hausdorf, Friedemann: Handbuch der Lautsprechertechnik. 2013, S. 67.

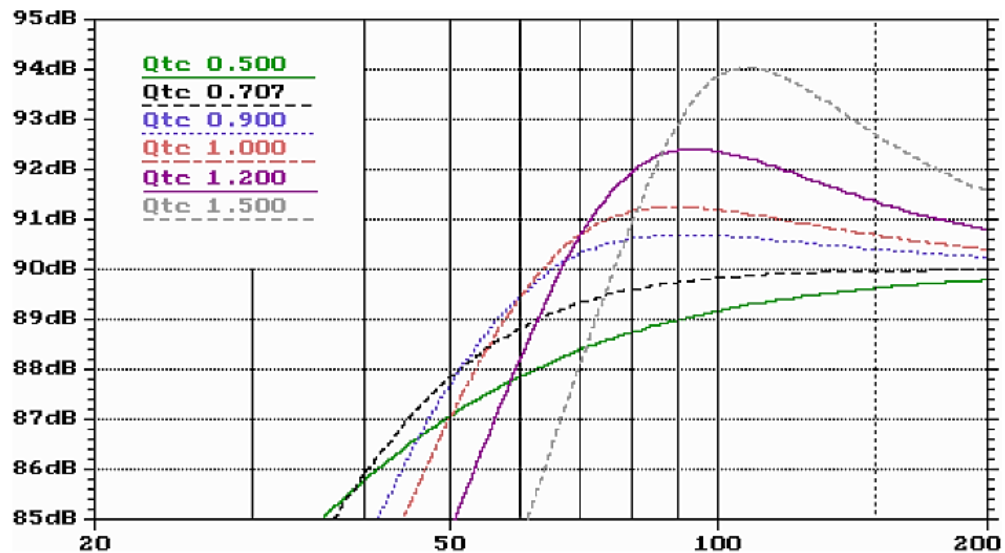


Abbildung 8: **Q-Faktoren** (Kirschner elektronik; photostory, 2007, S. 36)

Für die Volumenberechnung einer geschlossenen Lautsprecherbox werden die Thiele-Small-Parameter des verwendeten Chassis benötigt. Diese TS-Parameter sind regulär in den Datenblättern des Herstellers zu finden. Bei der Resonanzfrequenz erreicht der Lautsprecher sein erstes Impedanzmaximum. Oberhalb dieser Frequenz gibt der Lautsprecher Frequenzen mit vollen Pegel wieder, unterhalb wird er stetig leiser. Das Boxenvolumen V_B und die Resonanzfrequenz f_c errechnet sich aus folgenden Werten:

- Äquivalentes Lufterfüllungsvolumen bzw. Äquivalentvolumen V_{AS}
- Freiluftgüte Q_{TS}
- Freiluft-Resonanzfrequenz f_s

Laut Datenblatt sind für den Tang Band W5-1611SA folgende Werte gegeben:

$$V_{AS} = 13,02 \text{ Liter}$$

$$Q_{TS} = 0,44$$

$$f_s = 60\text{Hz}$$

Für die Gesamtgüte der zusammengebauten Lautsprecherbox gilt:

$$Q_{TC} = Q_{TS} * \sqrt{\frac{V_{AS}}{V_B} + 1}$$

Formel 1: Gesamtgüte Q_{TC}

Bei der Box wird ein Q_{TC} von etwa 0,7 bis 0,71 angestrebt. Die Gleichung lässt sich nach dem Boxenvolumen umstellen:

$$V_B = \frac{V_{AS}}{\left(\frac{Q_{TC}}{Q_{TS}}\right)^2 - 1}$$

Formel 2: Boxenvolumen V_B

Für den W5-1611SA ist also ein Gehäusevolumen von 8,1 bis 8,5 Litern empfehlenswert. Die Resonanzfrequenz f_c wird berechnet mit den Gleichungen:

$$f_c = \frac{Q_{TC} * f_s}{Q_{TS}}$$

Formel 3: Resonanzfrequenz f_c nach der Güte

$$f_c = f_s * \sqrt{\frac{V_{AS}}{V_B} + 1}$$

Formel 4: Resonanzfrequenz f_c nach dem Volumen

Daraus ergibt sich eine Resonanzfrequenz zwischen 95Hz und 97Hz.

Für das Gehäusevolumen werden letztendlich runde 8 Liter gewählt. Damit ergibt sich eine Kantenlänge von 20cm für die inneren Gehäusedimensionen. Bei einer Wandstärke von 22mm bekommt die Box eine Kantenlänge von 24,4cm. Die quadratische Schallwand hat somit die gleichen Ausmaße. Zusätzlich sollten noch der Chassis-Magnet und die Anschlussterminalrückseite berücksichtigt werden. Bei der Wandstärke, dem filigranen Korb und dem kleinen Neodymmagneten können 7,9 Liter geschätzt werden. Mit diesen Volumen hat die Box zunächst einen leicht höheren Q_{TC} von 0,716 und eine Resonanzfrequenz von 97,64Hz.

Dass Breitbandssysteme eine starke Bündelung in den hohen Frequenzen aufweisen ist bekannt. Die Frequenz (f_{max}) bei der die Höhen in 30° angewinkelter Abhörposition hörbar Pegel verlieren, lässt sich ebenfalls berechnen:

$$f_{max} = \frac{c}{D}$$

Formel 5: Grenzfrequenz f_{max} der Bündelung

Mit der Schallgeschwindigkeit c von 344m/s und einem Membrandurchmesser D von 13cm (5“), ist ein Pegelverlust bereits ab ca. 2646Hz zu erwarten. Breitbandchassis mit 8 Zoll bündeln bereits ab 1700Hz. 3 Zoll Chassis bündeln erst ab 4300Hz.

5.2 Stehende Wellen und Gehäusedämpfung

Die Gehäusegeometrie in Form eines Würfels ist für eine Lautsprecherkonstruktion eher kontraproduktiv. Einige Studiobreitbänder weisen diese Maße auf. Da sich in den Boxen parallele Wände gegenüberstehen, können sich stehende Wellen ausbilden. Diese machen sich als Luftresonanzen bemerkbar und führen zu Überhöhungen und Einbrüchen im Frequenzgang. Besonders bei Lautsprechern mit steifer Membran haben diese Resonanzen eine Rückwirkung auf das Schwingverhalten. Dies bewirkt eine zusätzlich verzögerte Schallabstrahlung des Lautsprechers und damit eine Verfälschung des Klanges. Außerdem haben diese Resonanzen einen negativen Einfluss auf die Impulswiedergabe. Gerade bei der Würfelform wird dieser Effekt noch verstärkt, da die stehenden Wellen in allen Dimensionen bei den gleichen Frequenzen auftreten.

Um dem entgegenzuwirken werden die Boxen großzügig mit Dämmstoffen gefüllt. Das Ausstopfen des gesamten Volumens mit z.B. Dämpfungswolle oder lockerem Flies, kann die Resonanzen durch stehende Wellen wirksam eindämmen. In der Mitte der Box, direkt hinter dem Chassis, ist die Bewegung der Luftteilchen am größten und einfachsten zu verhindern. Deshalb ist ein konzentrierter Einsatz von Dämpfungsmaterial besonders in der Mitte des Volumens wichtig. Ein Anbringen nur an den Gehäuseinnenwänden ist wirkungslos.

Um herauszufinden, ob das verwendete Dämpfungsmaterial effektiv den stehenden Wellen entgegenwirkt, müssen die anfälligen Frequenzen bekannt sein. Da alle Dimensionen im Gehäuseinneren die gleichen Längen aufweisen, lassen sich diese Frequenzen sehr einfach berechnen. Stehende Wellen sind Resonanzen, die zwischen den Begrenzungsflächen eines Raumes entstehen. Diese Resonanzen treten auf, wenn ein Vielfaches der halben Wellenlänge einer Frequenz zwischen zwei parallele Wände passt.

Mit der Schallgeschwindigkeit c und den Raumabmessungen der Box lässt sich mit folgender Gleichung leicht die erste Erregerfrequenz ermitteln:

$$f_E = \frac{c}{2 * B}$$

Formel 6: Erregerfrequenz f_E für stehende Wellen

Ganzzahlige Vielfache der errechneten Frequenz sind ebenfalls kritisch.

Für $c = 344\text{m/s}$ und dem Wandabstand $B = 0,2\text{m}$ sind folgende Frequenzen anfällig für Resonanzen:

860Hz; 1720Hz; 2580Hz; 3440Hz; 4300Hz; 5160Hz; 6020Hz; 6880Hz; 7740Hz; usw.

Anhand des im Datenblatt angegebenen und des gemessenen Amplitudenfrequenzganges, lässt sich leicht überprüfen ob Raumresonanzen den Frequenzverlauf beeinflussen.

Die Gehäuse der Testboxen wurden großzügig mit verschiedenen Materialien gestopft. Lockeres und verdichtetes Polyesterfließ wurden mit Hilfe von 4cm Pyramidschaum mittig im Gehäuse verteilt. Mit einer derart dichten Dämpfung sind Resonanzen in den höheren und mittleren Frequenzen sehr unwahrscheinlich. Laut Herstellerangaben sollen mit den verwendeten Materialien Frequenzen über 300Hz problemlos gedämpft werden.¹ Damit sollten keine der errechneten Frequenzen störende Resonanzen erzeugen.

Die großzügige Gehäusedämpfung hat, neben der Resonanzreduzierung, noch weitere Nebeneffekte, die beachtet werden müssen. Bei dichter Dämpfung verringert sich das tatsächlich benötigte Volumen um ca. 20 Prozent. Bei den Testboxen ergibt sich somit eine Volumenvergrößerung um den Faktor 1,2. Dem zufolge lassen sich durch das vergrößerte Volumen, die Güte der Box und ihre Resonanzfrequenz anschließend noch beeinflussen.²

Das neu errechnete Volumen beträgt nun bei der gestopften Box 9,48 Liter. Die Resonanzfrequenz sinkt auf 92,44Hz. Die Güte Q_{TC} verringert sich auf 0,678. Für den Fall, dass später noch Entzerrschaltungen verbaut werden müssen, ist eine leicht geringere Güte vom Vorteil, denn durch die zusätzlichen elektronischen Bauteile, wird die Güte des Lautsprechers erhöht (siehe Kapitel 5.3).

Dennoch sollte eine Überdämpfung der Box vermieden werden, da sie ab einem bestimmten Grad negative Auswirkungen haben kann. Bei zu viel Dämpfungsmaterial sinkt die Federkonstante nicht weiter, sondern steigt wieder an. Nach der Überdämpfung sinkt die Resonanzfrequenz, bei steigendem Füllgrad, nicht weiter ab. Ein Resonanzfrequenzanstieg ist die Folge. Der zunehmende Dämpfungsverlust bewirkt außerdem einen Wirkungsgradverlust des Pegels im Bereich der Resonanzfrequenz. Ist die Füllmenge des

¹ VISATON GmbH & Co. KG, Bedämpfung von Gehäusen, 12.05.2014

² Frießecke, Andreas: Die Audio-Enzyklopädie. Nachschlagewerk für Tontechniker, München 2007 S. 457

Dämpfungsmaterials richtig dimensioniert, kommt es nur zu einem Pegelverlust von einem dB. Bei einer Überdämpfung kann mit einem Verlust von 3dB gerechnet werden.¹

Aus diesen Gründen ist es wichtig die Vorgaben des Dämpfungsmaterial-Herstellers zu beachten. Bei dem Materialeinsatz in den Testboxen sind noch keine Nebenwirkungen einer Überdämpfung auftreten.

5.3 Baffle Step Diffraction

Neben dem Gehäusevolumen, haben die Maße der Schallwand und die Position des Chassis auf dieser, einen ebenso großen Einfluss auf den Frequenzgang. Die Schallwellen einer Punktschallquelle breiten sich in einem Raum gleichmäßig in alle Richtungen aus (4π -Abstrahlung). Befindet sich diese Punktschallquelle auf einer unendlich großen Schallwand, so wird diese Schallenergie nur noch in einem halb so großen Raum abgestrahlt (2π -Abstrahlung). In diesem Halbraum wird der Schalldruck somit doppelt so hoch. Bei einer endlichen Schallwand strahlen Schallwellen hoher Frequenzen in den halben und Schallwellen niedriger Frequenzen in den vollen Raum. Der frequenzabhängige Übergang des Schalldruckes zwischen Halb- und Vollraum wird als Baffle Step Diffraction (BSD) bezeichnet.

Der Baffle Step ist der Pegelverlust ab einer bestimmten Frequenz, hervorgerufen durch die Schallbeugung an den Schallwandkanten von Lautsprecherboxen. Die Schallwellen werden bis zu einer bestimmten Frequenz von der schallharten Gehäusefront reflektiert. Wird diese Frequenz unterschritten, tritt eine Beugung der Schallwellen auf. Sind die Wellenlängen kleiner als die Schallwandabmessungen, strahlt der Lautsprecher nur in einem 180° -Winkelraum vor der Schallwand. Sind die Wellenlängen größer, so strahlt der Lautsprecher in alle Raumrichtungen. Unterhalb dieser Frequenz muss dann die gleiche Energie an das doppelte Volumen abgegeben werden. Dies hat nun unterhalb der Baffle-Step-Frequenz einen Pegelverlust von 6dB zur Folge. Die Grenzfrequenz des Baffle Steps und dessen Frequenzbandbreite ist von der Größe und Geometrie der Schallwand abhängig.²

Damit wäre die ungünstigste Schallwandform, die einer kreisrunden Fläche. Die Quadratische Schallwandform der Studiobreitbänder, lässt ebenfalls einen sehr deutlichen

¹ VISATON GmbH & Co. KG, Bedämpfung von Gehäusen, 12.05.2014

² Martin J. King, Simple Sizing of the Components in a Baffle Step Correction Circuit, 04.04.2014

Pegelanstieg innerhalb weniger Frequenzen erwarten. Eine rechteckige Lautsprecherfront mit leicht versetztem Treiber hätte einen weniger deutlich ausgeprägten Baffle Step im Frequenzverlauf. Abgerundete oder -geschrägte Schallwandkanten wirken sich ebenfalls positiv auf den Baffle Step aus.

Mit einer einfachen Rechnung lässt sich die Frequenz des Pegelanstieges näherungsweise berechnen.

$$f_{\text{Step}} = \frac{115}{W}$$

Formel 7: Baffle-Step-Frequenz f_{Step} – Näherungsrechnung

W ist hierbei die Schallwandbreite in Metern. Bei den 24,4cm Schallwandbreite der Testboxen, kann der Einsatz des Baffle Step bei ca. 470Hz erwartet werden.

Der Baffle Step ist ein Grund, weshalb auch bei Breitbandsystemen Entzerrschaltungen notwendig sind. Einige Modelle sollen bereits ab einer Schallwandbreite von 40cm ohne Beschaltung betrieben werden können. Leider verhindern überpräsenste Höhen durch Membranresonanzen bei vielen Chassis einen schaltungsfreien Betrieb. Dennoch werden die meisten Studiobreitbänder komplett ohne Entzerrschaltung angeboten. Eine Ausnahme wäre der Neumann M52. Laut Datenblatt wird ihm ein recht linearer Frequenzgang bescheinigt, allerdings mit ausgeprägten Membranresonanzen ab 8kHz.

In kleinen Gehäusen ist somit ein linearer Frequenzgang ohne Beschaltung beinahe komplett auszuschließen. Inwieweit eine speziell geformte Schallwand bei kleinen Gehäusen zu einer Verbesserung führt, muss erst untersucht werden. Ein Betrieb ohne Entzerrschaltung ist vorerst nur mit sehr großen Schallwänden denkbar. Dies führt zu unpraktischen Boxendimensionen, die handelsübliche Boxengrößen bei weitem überschreiten.

Mit einem gezielten Einsatz von Spulen, Kondensatoren und Widerständen kann der Frequenzgang nachträglich begradigt werden. Dabei müssen folgende Eigenschaften der elektronischen Bauteile beachtet werden:

Widerstände arbeiten linear und sind somit nicht frequenzabhängig. Eine Frequenzänderung hat also keinen merklichen Einfluss auf den Widerstandswert. Der Widerstand ist somit nur ein Widerstand für den im Leiter fließenden Strom. Die Intensität der Abschwächung des Stromflusses wird vom Widerstandswert festgelegt. Dadurch lassen sich Lautstärken anpassen und beeinflussen. Dies kann durch Reihenschaltung zum Chassis oder durch den Aufbau eines Spannungsteilers geschehen. Da ein Reihenwiderstand den Gesamtwiderstand der Schaltung sehr beeinflusst, sollte er bis maximal

zu einer Anpassung von 5dB eingesetzt werden. Ab 5dB ist ein Spannungsteiler zu empfehlen, da hier der Gesamtwiderstand annähernd gleich bleibt. Beim Spannungsteiler wird nach dem Reihenwiderstand zum Chassis noch ein Parallelwiderstand hinzugelötet (Abb. 9).

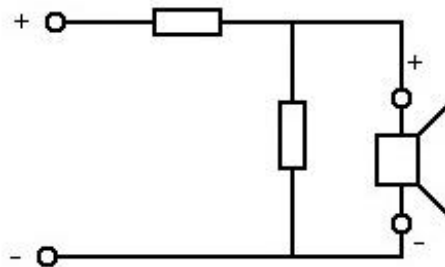


Abbildung 9: **Spannungsteiler** (Eigene Darstellung, in Anlehnung an: Icy-Medien GmbH, 2007)

Die Impedanz (Widerstand) einer Spule steigt linear mit der Frequenz an und die des Kondensators fällt mit dem Kehrwert der Frequenz. Bei der Grenzfrequenz beträgt die Filterwirkung 3dB. Ein Kondensator wird bei tiefen Frequenzen sehr hochohmig und entzieht dem Lautsprecher damit die gemeinsame Spannung. Bei hohen Frequenzen wird der Kondensator niederohmig und die meiste Spannung fließt in den Lautsprecher. Wird zu diesem Kondensator ein Widerstand parallel geschaltet, kann die Schaltung nicht beliebig hochohmig werden. Der Lautsprecher verliert bei tiefen Frequenzen nur einen konstanten Anteil der Spannung (Abb. 10). Bei Spulen verhält es sich genau anders herum (Abb. 11).

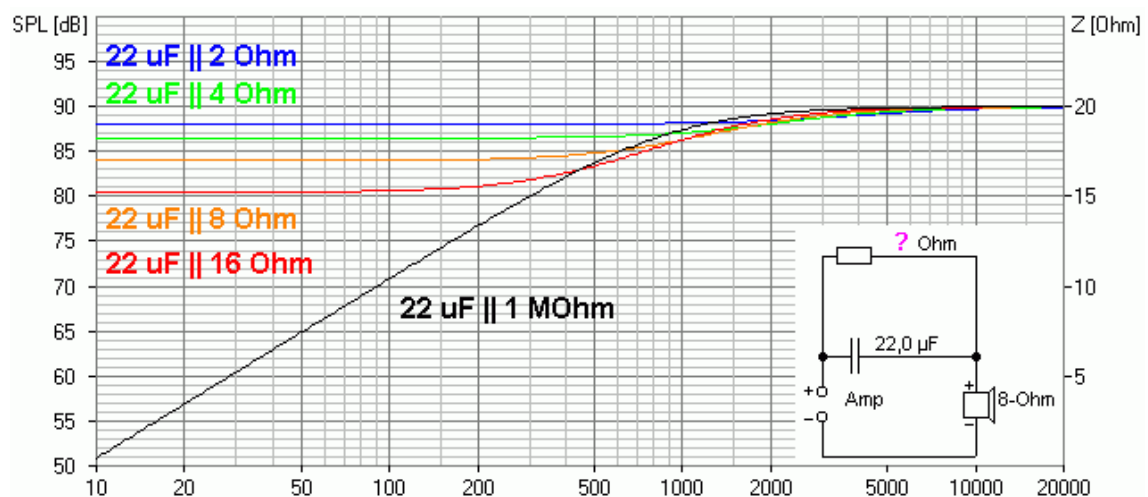
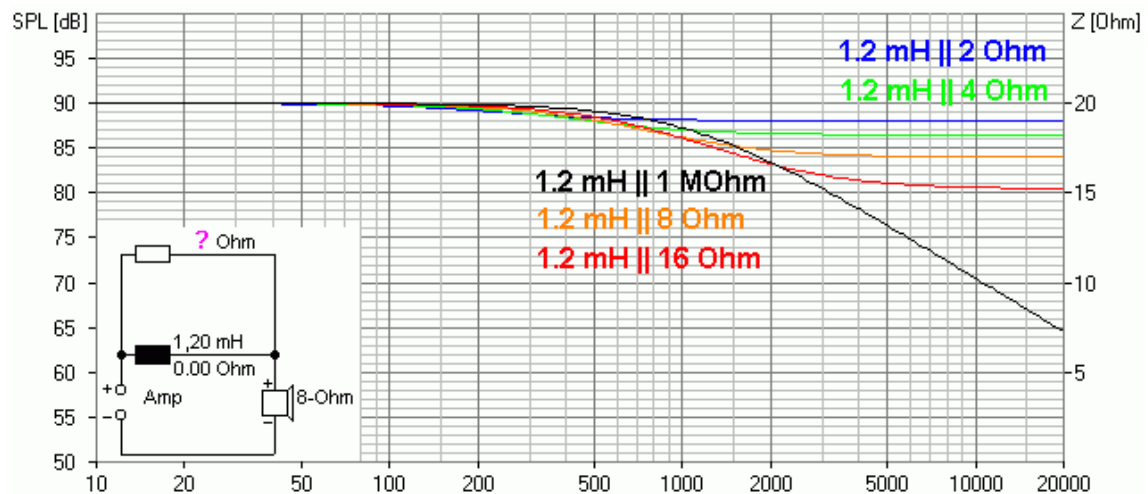


Abbildung 10: **Verbiegeschaltung – Kondensator** (Icy-Medien GmbH, 2007)

Abbildung 11: **Verbiegeschaltung – Spule** (lcy-Medien GmbH, 2007)

Mit diesen einfachen Verbiegeschaltungen können die Pegelsprünge des Baffle Steps kompensiert werden. So wird ab einer bestimmten Frequenz eine Absenkung des Frequenzganges erzielt.

Die Bauteilwerte können mit diesen Gleichungen berechnet werden:

$$L = \frac{Z * 1000}{2\pi * f_G} \text{ [mH]}$$

Formel 8: Induktivität L der Spule für Grenzfrequenz f_G :

$$C = \frac{1\,000\,000}{2\pi * Z * f_G} \text{ [\mu F]}$$

Formel 9: Kapazität C des Kondensators für Grenzfrequenz f_G

Z = Lautsprecherimpedanz (8Ω)

f_G = Grenzfrequenz

C = Kapazität des Kondensators

L = Induktivität der Spule

Die Kombination aus beiden Schaltungen ist ein einfacher Sperrkreis. Hier wird eine Parallelschaltung aus Spule, Kondensator und Widerstand in Reihe zum Lautsprecher geschaltet. Mit einem Sperrkreis lassen sich gezielt überbetonte Frequenzen absenken

(Abb. 12). Allerdings muss auch beachtet werden, dass die Gesamtimpedanz der Schaltung ansteigt. Die Berechnung der benötigten Bauteilwerte erfolgt analog zu den Verbiegeschaltungen.

Die Mittenfrequenz der Absenkung wird mit folgender Formel berechnet:

$$f_M = \frac{1\,000\,000}{2 * \pi * \sqrt{L [\mu H] * C [\mu F]}}$$

Formel 10: Sperrkreis Mittenfrequenz f_M

Die Breite der Sperrwirkung kann unabhängig von der maximalen Sperrwirkung eingestellt werden. Für eine schmalbandigere Absenkung wird die Spule verkleinert und der Kondensator vergrößert. Für eine breitbandigere Absenkung wird die Spule vergrößert und der Kondensator verkleinert. Geschieht dies um denselben Faktor, bleibt die Sperrfrequenz gleich.

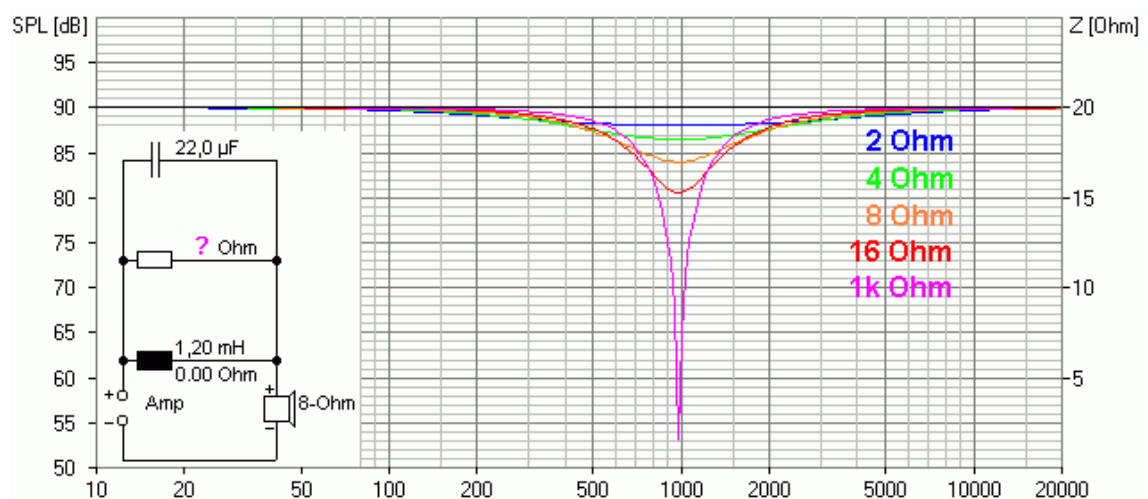


Abbildung 12: **Sperrkreis** (Icy-Medien GmbH, 2007)

Die nötigen Widerstandswerte lassen sich nur schwer ermitteln, weil sie von der Impedanz des Lautsprechers beeinflusst werden. Aufgrund der Induktivität der Schwingspule, steigt die Impedanz des Lautsprechers bei hohen Frequenzen stark an. Deshalb ist eine zusätzliche Impedanz-Begradigung empfehlenswert. Um der Impedanzhöhung entgegenzuwirken (Abb. 13), wird eine Reihenschaltung aus Kondensator und Widerstand parallel zum Lautsprecher geschaltet.

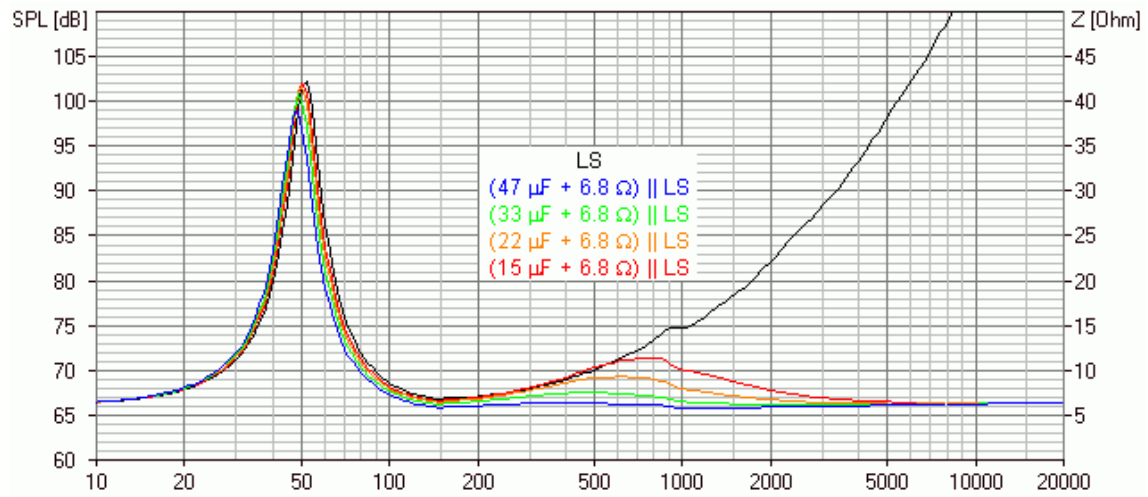


Abbildung 13: Impedanzentzerrung (lcy-Medien GmbH, 2007)

Zur Berechnung müssen die Schwingspuleninduktivität L_s und der Gleichstromwiderstand R_{DC} des Lautsprechers bekannt sein.

$$R = R_{DC} + \frac{R_{DC}}{2}$$

Formel 11: Widerstand R für Impedanzentzerrung

$$C[\mu F] = \frac{L_s[\mu H]}{R^2}$$

Formel 12: Kapazität C des Kondensators für Impedanzentzerrung

Die TB W5-1611SA haben eine Induktivität von 0,11mH und ein R_{DC} von 6,8Ω. Für die Impedanzlinearisierung der Testbox, sind ein Widerstand mit 10,2Ω und ein Kondensator mit einer Kapazität von 1,06μF notwendig.

Nach der Impedanzbegradigung lässt sich auch näherungsweise der benötigte Widerstand für den Sperrkreis berechnen:

$$R = \frac{1}{2\pi * C * B_f}$$

Formel 13: Widerstand R für Sperrkreis

Hierfür wird die Kapazität C des Kondensators für den Sperrkreis benötigt. Dieser wird mit Formel 9 ermittelt. B_f ist dabei die Bandbreite der abzusenkenden Frequenzen. Diese errechnet sich aus der Differenz der beiden Grenzfrequenzen f_G für den Sperrkreis.

Alternativ können auch mit Saugkreisen Frequenzen linearisiert werden. Der Saugkreis besteht aus einer Reihenschaltung von Spule, Kondensator und Widerstand und ist parallel zum Chassis geschaltet.

Spulen und Kondensatoren bewirken allerdings auch eine Phasendrehung von 90°. Bei Mehrwegesystemen muss dieser Sachverhalt bei der Planung der Frequenzweiche beachtet werden, um Phasenfehler und -Sprünge zu vermeiden. Bei Einwegelautsprechern sind diese Phasendreher weniger kritisch, da es zu keinen Laufzeitfehlern durch die Aufteilung auf mehrere Chassis kommen kann.

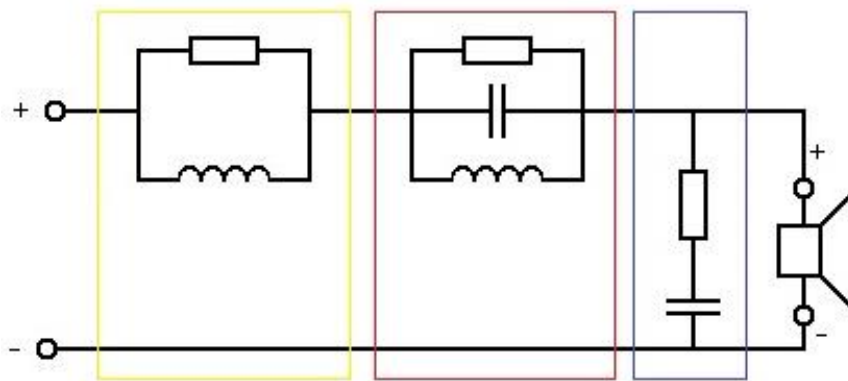


Abbildung 14: **Entzerrschaltung** (eigene Darstellung, in Anlehnung an: Icy-Medien GmbH, 2007)

Mit der abgebildeten Schaltung lässt sich effektiv der Frequenzgang eines Breitbandlautsprechers begradigen (Abb. 14). Für die verbauten Widerstände sollten regelbare Varianten gewählt werden. Mit diesen Potentiometern können die jeweiligen Absenkungen besser justiert und angepasst werden. Die Verbiegeschaltung (gelb) korrigiert den Pegelanstieg durch den Baffle Step. Mit dem Sperrkreis (rot) können die Membranresonanzen in den hohen Frequenzen verringert werden. Weitere Sperrkreise in Reihenschaltung können weitere Frequenzüberhöhungen ausgleichen. Das RC-Glied (blau) parallel zum Lautsprecher dient zur Impedanzentzerrung. Hier sollte kein Potentiometer verwendet werden, da für diesen Widerstand ein fixer Wert bestimmt und benötigt wird.

Der Ohm'sche Widerstand der verbauten Spulen R_L muss zum R_{DC} des Lautsprechers hinzuaddiert werden. Dadurch erhöht sich der Gesamtgütefaktor Q_{TS} des Chassis. In dem Zusammenhang vergrößert sich auch der Q_{TC} -Wert der Box. Der neue Q_{TS} berechnet sich wie folgt:

$$Q'_{TS} = \frac{R_{DC} + R_L}{R_{DC}} * Q_{TS}$$

Formel 14: Korrigierte Gesamtgüte des Chassis

Um die Güte der Box durch die Bauteile nicht gravierend zu verschlechtern sollten möglichst Spulen mit einem geringen Widerstand gewählt werden. Deshalb ist es ratsam die Dimensionen des Gehäuses so zu wählen, dass eine leicht geringere Güte als 0.7 erreicht wird.

Ist der Amplitudenfrequenzgang nach einer Messung bekannt, kann mit diesen Maßnahmen der Übertragungsverlauf entsprechend angepasst werden. Der Schallwand-Sprung (Baffle Step) und auftretende Membranresonanzen werden so gezielt bearbeitet und korrigiert. Alternativ kann auch bei bekanntem Frequenzverlauf ein Equalizer eingesetzt werden um die Lautsprecher zu entzerren. Dieses Vorgehen hat unter Umständen auch Vorteile, da flexibler auf die jeweiligen Raumeinflüsse eingegangen werden kann.

Egal wie eine Entzerrung von Lautsprechern durchgeführt werden soll, eine vorherige Messung ist unbedingt notwendig. Nur so kann effektiv und gezielt der Frequenzgang des Lautsprechers begradigt werden.

6 Messungen

Die Messungen erfolgten im reflexionsarmen Raum des ME-Geithain Messlabors (Abb. 15). Übertragungsverläufe (Amplitudenfrequenzgänge), nichtlineare Verzerrungen (Klirrfaktoren) und Sprungantworten wurden in dieser Freifeldmessung ermittelt. Hierfür befand sich das Messmikrofon in einem Meter Abstand vor den Lautsprechern. Der Übertragungsverlauf wurde frontal auf der akustischen Achse gemessen. Für die Untersuchung der Richtwirkung wurden die Lautsprecher um 30° und 45° horizontal zur Bezugsachse gedreht und erneut gemessen. Ein Sinus mit konstanter Amplitude und stetig aufsteigender Frequenz (Sinus Sweep) diente hierbei als Messsignal. Für die Messung der Klirrfaktoren wurde der Mindestschalldruckpegel auf 90 dB (SPL) festgelegt. Die Messung der Sprungantwort erfolgte im Anschluss.

Von den Studio-Breitbandsystemen wurde jeweils ein Modellvertreter der verfügbaren Gehäusevarianten (Kap. 3) gemessen. Dazu gehörten der Behringer Behritone C50a und der Fostex 6301B. Mit der Testbox waren somit drei Breitbandsysteme im Messraum. Für die Vergleichbarkeit mit Mehrwegesystemen im gleichen Preissegment wurde auch ein Samson Resolv A8 eingemessen. Im Anhang B befinden sich weitere Messdaten, welche zum Teil ebenfalls bei ME-Geithain durchgeführt wurden.

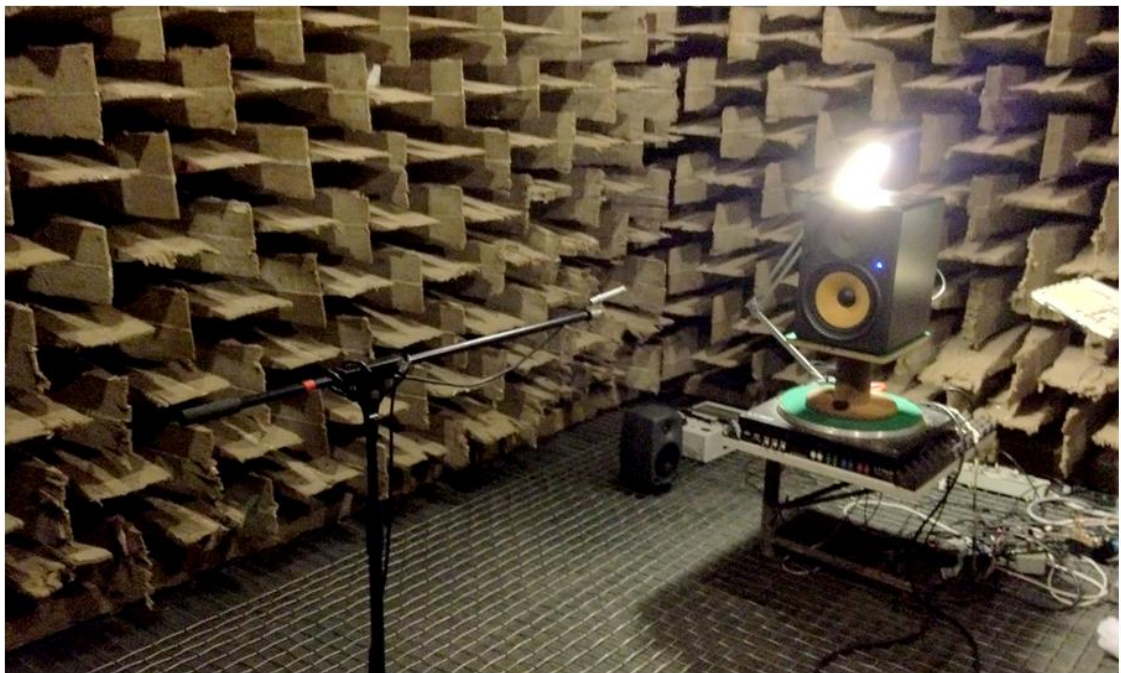


Abbildung 15: **Freifeldmessung bei ME Geithain** (Bonedo, 2012)

6.1 Amplitudenfrequenzgang und Abstrahlverhalten

Für eine klanglich neutrale Wandlung sollten Regielautsprecher alle hörbaren Frequenzen mit konstantem Schalldruck wiedergeben. Der Amplitudenfrequenzgang beschreibt, wie laut einzelne Frequenzen von einem Lautsprecher umgewandelt werden. In der Übertragungskurve wird der frequenzabhängige Schalldruckpegel eines Lautsprechers aufgezeichnet. Damit lässt sich der Amplitudenfrequenzgang eines Lautsprechers darstellen. Im Anhang A1 sind die gemessenen Amplitudenfrequenzgänge der einzelnen Lautsprecher aufgelistet.

Tang Band (Testbox)

Die Testbox mit dem Tang Band Chassis hat eine untere Grenzfrequenz von ca. 90Hz. Diese entspricht knapp der errechneten Resonanzfrequenz von 92,44Hz. Unterhalb fällt die Kurve mit 12dB pro Oktave ab. Durch den Einbau des Chassis in ein geschlossenes Gehäuse entspricht dies einem Hochpassfilter zweiter Ordnung. Die Obere Grenzfrequenz beträgt etwa 15kHz. Somit überträgt die Box einen Frequenzbereich von 90Hz bis 15kHz. Besonders auffällig ist ein Pegelanstieg ab ca. 500Hz. Dabei handelt es sich um den Baffle Step. Nach dessen Berechnung wurde die Position des Pegelsprungs ab 470Hz vermutet. Einer ausgeprägten Senke bei 3kHz folgt ein sehr welliger Frequenzverlauf in den Höhen. Die Pegelspitzen bei 4kHz und 5kHz werden sehr wahrscheinlich von Membranresonanzen verursacht. Bei einer angewinkelten Messposition beginnt der Frequenzeinbruch ab ca. 2,6kHz. Dies entspricht dem errechneten Einsatz der Bündelung bei 2646Hz. In einem Winkel von 30° erreicht die Box ab 6kHz keinen nennenswerten Pegel mehr. Bei 45° ist bereits ab 3kHz ein starker Frequenzeinbruch zu vermerken. Stehende Wellen scheinen den Frequenzverlauf nicht zu beeinflussen, da dieser dem Verlauf aus dem Datenblatt entspricht (Anhang C1). Die Charakteristik des Frequenzverlaufs entspricht auch der Messung des Chassis in einer IEC-Normwand (Anhang C2).

Mittels einer Baffle Step Korrektur ist es durchaus möglich mit dieser Box ein ausgewogenes Klangbild zu erzeugen (Anhang A3). Die Membranresonanzen lassen sich mit diversen Filtern eindämmen. Um jedoch den Verlauf noch weiter zu glätten, ist ein weit- aus größerer Materialaufwand nötig. Eine gewisse Restwelligkeit wird in den Höhen bleiben.

Behringer

Der Behritone C50a hat eine untere Grenzfrequenz bei etwa 200Hz und einen sehr ausgeprägten Baffle Step ab 700Hz. Der Bereich zwischen 700Hz und 3kHz ist deutlich überbetont. Nach einer Senke bei 4kHz und darauf folgenden Membranresonanzen bei

4,6kHz und 6,6kHz ist bereits die obere Grenzfrequenz von 10kHz erreicht. Der Übertragungsverlauf der Box reicht somit nur von 200Hz bis 10kHz. Der Pegelverlust bei größerem Abhörwinkel beginnt bereits bei 1,5kHz. Allerdings ist ein extremer Pegel einbruch erst ab 4kHz zu vermeiden. Oberhalb der 4kHz sind in angewinkelter Messung Pegelverluste über 5dB bei 30° und 12dB bei 45° ersichtlich.

Fostex

Der Fostex 6301 hat eine untere Grenzfrequenz von etwa 100Hz und erzeugt bis 10kHz vollen Pegel. Der Übertragungsbereich beläuft sich auf 100Hz bis 10kHz. Der gesamte Frequenzverlauf ist extrem ungleichmäßig und die genaue Position des Baffle Steps lässt sich nur schwer bestimmen. Bei den gegebenen Gehäusedimensionen und dem Frequenzverlauf befindet er sich wahrscheinlich bei 1,2kHz. Von 100Hz bis 400Hz sind die unteren Frequenzen sehr betont. Im Bereich zwischen 400Hz und 600Hz ist eine sehr ausgeprägte Senke mit bis zu 5dB Pegeldifferenz. Ab 500Hz steigt der Pegel bis zu 2,3kHz um fast 10dB an. Darauf folgt ein Pegelabfall um 5dB bei 4kHz. Bis 10kHz steigt daraufhin der abgestrahlte Pegel um weitere 10dB an. Aufgrund der kleineren Membran ist die Bündelung in den hohen Frequenzen weniger stark ausgeprägt. Ab 5kHz tritt ein starker Pegelverlust ein.

Samson

Der Resolv A8 hat eine tiefe untere Grenzfrequenz von 50Hz. Im oberen Frequenzbereich ab 17kHz fällt der abgestrahlte Pegel deutlich ab. Der gesamte Frequenzverlauf ist sehr wellig, im Mittel jedoch recht ausgewogen. Die Frequenzen zwischen 70Hz und 100Hz sind dennoch sehr überbetont und sind bis zu 5dB lauter als im folgenden Verlauf. Bei 400Hz und 4kHz sind zwei deutliche Senken zu erkennen. Dem gegenüber stehen weitere Verlaufsspitzen bei 800Hz bis 900Hz, bei 2,5kHz und bei 6kHz bis 8kHz. Der Frequenzverlauf hat somit deutliche Pegelschwankungen von bis zu 7,5dB. Der Pegelverlust in angewinkelter Abhörposition hält sich dafür weitestgehend in Grenzen. Der Pegelverlust bei angewinkelter Messung beginnt zwar bereits ab etwa 500Hz, dennoch bleibt der Verlauf gleichmäßig auf einem Level von durchschnittlich -3dB. Erst ab 10kHz fallen die Pegel deutlich ab.

6.2 Klirrfaktor

Der Klirrfaktor ist die am häufigsten verwendete Messgröße für die Ermittlung von nicht-linearen Verzerrungen. Bei der Verzerrung einer sinusförmigen Schwingung entstehen Oberschwingungen. Mit dem Klirrfaktor lässt sich die Intensität der Oberschwingungen im Vergleich zum Gesamtsignal ermitteln.

Das Klirren eines Lautsprechers entsteht, wenn die Bewegung der Schwingspule dem Eingangssignal nicht mehr linear folgen kann. Dies geschieht wenn die Spule bei großem Membranhub das homogene Magnetfeld verlässt oder die Sicke den Membranhub mechanisch begrenzt. Bei beiden Fällen erfolgt eine Abflachung der Auslenkungsspitzen, wodurch neue Obertöne entstehen, die sich messtechnisch nachweisen lassen. Der Klirrfaktor ist dann der Anteil der Oberwellen in Prozent. Dabei wird jedoch zwischen Gesamtklirrfaktor k und den Teilkirrfaktoren k_n unterschieden.

Gemessen wurden die Klirrfaktoren zweiter und dritter Ordnung (k_2 ; k_3). Daraus lässt sich der Gesamtklirrfaktor k für die jeweilige Frequenz berechnen:

$$k = \sqrt{k_2^2 + k_3^2}$$

Formel 15: Klirrfaktor k

Tang Band (Testbox)

Die Testbox zeigt kaum Auffälligkeiten bei der Klirrmessung. Die Teilkirrfaktoren bleiben bei allen Frequenzen unterhalb von 1%. Bei 1,25kHz steigt K_2 auf 0,8%. An dieser Position weist auch die Impedanzkurve einen leichten Anstieg auf (Datenblatt Anhang C1). Diese Verzerrung führt auch zu einem leichten Pegelverlust bei dieser Frequenz. K_3 ist bei dieser Frequenz nicht erhöht, somit bleibt auch der Gesamtklirrfaktor unterhalb von 1%. Bei 3,3kHz gibt es ebenfalls noch einen leichten Klirranstieg von K_2 auf knapp 0,9%. Der Gesamtklirrfaktor erreicht hier ebenfalls nicht 1 %. Unter 250Hz wurde ebenfalls ein Klirranstieg gemessen. Ob dieser im tieferen Verlauf die 3% übersteigt ist aus der Messung nicht ersichtlich. Die Testbox ist somit annähernd klirrfrei.

Behringer

Der Behritone hat ein ähnlich gutes Klirrverhalten wie die Testbox. Allerdings werden bei K_2 und K_3 neue Obertöne gemessen. Diese Verzerrungen sind auch breitbandiger als bei der Testbox. Dennoch wird der Gesamtklirrfaktor von 1% bei keiner der wiedergegebenen Frequenzen überschritten. Der leichte Klirranstieg in den unteren Frequenzen ist weniger kritisch, da die Box in diesem Frequenzbereich bereits an Pegel verliert. Bis unterhalb der 250Hz ein Klirr von 3% erreicht werden könnte, ist die Box mindestens 6dB leiser.

Fostex

Bei dem 6301 ist das Klirrverhalten schon kritischer. In den unteren Frequenzen erreicht die Box einen Gesamtklirr von mehr als 5,5%. Somit treten bei der Box unterhalb der

400Hz deutlich hörbare Verzerrungen auf, denn hier hat die Box einen sehr betonten Frequenzgang. In den hohen Frequenzen wurden ebenfalls ausgeprägte Verzerrungen gemessen. K3 erreicht bei 3,4kHz einen Klirr von 1,8%. K2 steigt bei 5,3kHz sehr schmalbandig auf 3,6%. Diese Verzerrungen im Hochtון entstehen vermutlich durch Gehäuseresonanzen.

Samson

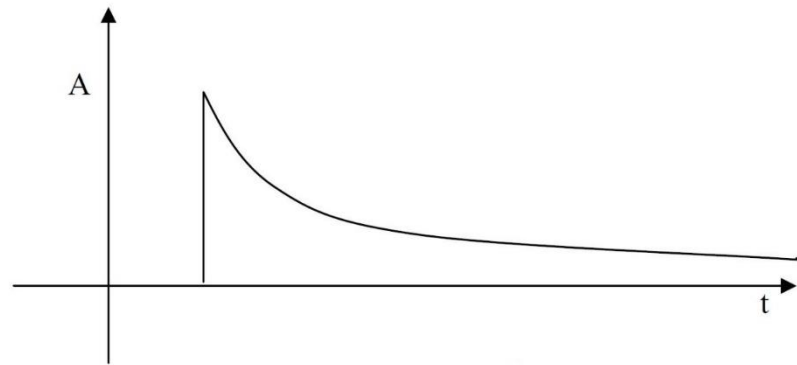
Der Resolv A8 hat im Hochtון keinen nennenswerten Klirr. K3 ist zwischen 1kHz und 2kHz bei beinahe einem Prozent. Mit K2 wird hier bereits ein Gesamtklirr von einem Prozent knapp überschritten. Diese Verzerrungen sind recht schmalbandig und sollten den Klang nicht wesentlich beeinflussen. Unterhalb der 500Hz erreicht der Gesamtklirr Werte über 1%. Zwischen 100Hz und 500Hz treten somit weitere Verzerrungen auf. K3 erreicht zwar kaum 0,5%, K2 überschreitet jedoch diesen Wert. Vermutlich werden diese von der Bassreflexöffnung verursacht. Der Klirranstieg unterhalb von 250Hz ist hier noch weit unter 3%.

6.3 Sprungantwort

An der Sprungantwort eines Lautsprechers lässt sich seine Zeitrichtigkeit erkennen. Zeitfehler entstehen normalerweise in Frequenzweichen, welche mit einer zu geringen Ordnung aufgebaut sind. Die Ordnung bestimmt dabei die Flankensteilheit der verwendeten Filter. Dadurch werden die gleichen Frequenzen von beiden Lautsprecherwegen wiedergegeben. Haben diese einen unterschiedlichen Phasenverlauf, kommt es zu Zeitfehlern. Sind die Schallquellen in ihrer Einbautiefe auch noch verschieden, werden diese Zeitfehler noch verstärkt. Zur Überprüfung seiner Zeitrichtigkeit muss der Lautsprecher ein Signal in Form der Sprungfunktion wiedergeben (Abb.16). Die Sprungfunktion hat zunächst eine Amplitude von 0. Ab einem bestimmten Zeitpunkt hat sie eine konstante und positive Amplitude.



Abbildung 16: **Sprungfunktion** (Kirchner elektroniks, 2007)

Abbildung 17: **Sprungantwort** (Kirchner elektroniks, 2007)

Dabei wird die Sprungantwort, also das vom Lautsprecher wiedergegebene Signal, aufgezeichnet (Abb.17). Im Idealfall steigt das Signal steil an und fällt exponentiell ab. Der steile Anstieg deutet auf eine hohe obere Grenzfrequenz hin. Der Abfall entsteht durch die Hochpassfunktion eines Lautsprechers. Wegen des Strahlungswiderstandes der Luft werden nur Frequenzen oberhalb der Grenzfrequenz wiedergegeben. Ein gleichmäßig exponentieller Abfall der Kurve tritt bei linearen Frequenzgängen auf. Anhand einer geringen Steilheit des Abfalls lässt sich eine tiefe untere Grenzfrequenz erkennen.

Mit der Sprungantwort lässt sich auch das Phasenverhalten des Lautsprechers beurteilen. Zeigt die Sprungantwort nur einen Anstieg und Abfall, liegen alle Einzellautsprecher auf einer akustischen Ebene und sind gleich gepolt. Der Phasenverlauf ist somit linear.

Bei den Breitbandsystemen verläuft die Sprungantwort zunächst ähnlich dem Idealfall. Gravierende Unterschiede fallen zwischen den Breitbändern nicht auf. Da sie nur ein Chassis besitzen, bleibt es auch nur bei einem Anstieg und dem darauf folgenden Abstieg der Kurve. Die Testbox hat einen sehr steilen Anstieg, jedoch auch einen recht steilen Abfall. Der steile Anstieg entspricht demzufolge ihrer hohen oberen Grenzfrequenz. Die untere Grenzfrequenz bei bereits 90Hz verursacht den ebenfalls steilen Abfall der Sprungantwort. Der Abfall verläuft bei keinem der Breitbandsysteme gleichmäßig exponentiell, da keine der Boxen einen linearen Frequenzverlauf aufweist. Das Ausschwingverhalten ist bei den Breitbändern annähernd ähnlich. Nach ca. 13ms erreichen die Membranen bereits ihre Ruhelage.

Der Resolv A8 hat einen sehr zerklüfteten und mehrstufigen Anstieg. Das Zweiwegesystem wurde offensichtlich nicht zeitlich abgeglichen. Der Phasenverlauf wird demzufolge deutliche Sprünge aufweisen. Hoch- und Tieftöner wandeln somit das Signal sehr zeitversetzt. Der Abfall ist, entsprechend der niedrigen unteren Grenzfrequenz, weniger steil. Im Vergleich zu den Breitbandsystemen ist das Ausschwingverhalten des Resolv A8 (rot) sehr schlecht. Erst nach 40ms erzeugt die Membran kein Nachschwingen mehr.

6.4 Auswertung

Die Messwerte zeigen sehr deutlich, dass keines der gemessenen Systeme den Anforderungen nach EBU Tech 3276 für Regielautsprecher gerecht wird. Selbst die Lautsprecher im Anhang B erfüllen nicht alle Kriterien einer vollwertigen Studioabhöre. Innerhalb der erreichten Grenzfrequenzen haben viele der gemessenen Lautsprecher Pegelschwankungen über der 4dB-Toleranz. Bei der Testbox hilft dabei auch keine Baffle-Step-Entzerrung.

Keiner der vier gemessenen Lautsprecher erreicht die empfohlene Bandbreite von 40Hz bis 16kHz. Die vorgegebene Bandbreite nach DIN EN von 80Hz bis 8kHz wird jedoch von einigen Mehrwegelautsprechern erfüllt (Anhang B) – den Samson Resolv A8 eingeschlossen. Allerdings überschreiten auch hier die Verlaufsschwankungen meistens die geforderte 3dB-Toleranz. Die Breitbandlautsprecher erfüllen die Vorgaben nach DIN EN ebenfalls nicht. Oberhalb der 500Hz haben alle Breitbandsysteme sehr ausgeprägte Variationen im Amplitudenfrequenzgang.

Durch ihre Bündelung haben alle gemessenen Breitbandlautsprecher, bei einem Messwinkel von 30° zur Hauptachse, Schwankungen jenseits der 4dB. Zwischen 5kHz und 10kHz wurden Pegelunterschiede von bis zu 20dB gemessen. Der Zweiwegelautsprecher Resolv A8 hat bis 8kHz, bei einem Messwinkel von 30°, Schwankungen innerhalb des Toleranzbereiches. Erst oberhalb der 8kHz treten Pegelunterschiede von 5dB auf.

Im Anhang B sind nur Messungen im Winkel von 45° durchgeführt worden. Deshalb wird an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen.

Bei den nichtlinearen Verzerrungen erfüllen die Breitbandsysteme im klassischen Design die Empfehlungen. Die Testbox und der Behritone Lautsprecher haben einen durchgängig niedrigen Klirr. Beim Avantone Mixcube (Anhang D3) zeigt sich ein ebenso positives Bild. Für eine klirrarne Signalwandlung sind Breitbandchassis in geschlossenen MDF-Gehäusen somit bestens geeignet.

Der Fostex 6301 hat hier jedoch seine Schwierigkeiten. Das Gehäuseinnenvolumen scheint zu knapp bemessen zu sein. Dies führt zwar zu einem betonteren Bassbereich, allerdings auch zu ausgeprägten Verzerrungen in dem selbigen. Das Gehäusematerial wird offensichtlich zum Resonieren angeregt und erzeugt reichlich Obertöne in den oberen Frequenzen.

Im Vergleich zu den Boxen im Anhang B hat der Samson-Lautsprecher ein respektables Klirrverhalten. Die Verzerrungen im Bassbereich sind zwar breitbandig, dafür aber noch knapp im Toleranzbereich. Viele der anderen Lautsprecher haben einen ausgeprägten

Klirr um die 500Hz. Nur wenige Modelle besitzen Gesamtklirrwerte innerhalb der Vorgaben.

Laut den Datenblättern der Hersteller erreicht keines der Breitbandsysteme im Abstand von einem Meter einen Maximalen Schalldruckpegel von 108dB. Mit 104dB ist der Avantone Mixcube, der lauteste Studiobreitbänder am Markt. Andere Breitbandsysteme liegen meist weit darunter. Der W5 1611SA der Testbox soll maximal 90dB erreichen. Auch viele kleine und/oder günstige Studiomonitore erreichen den empfohlenen Maximalpegel nicht. Der niedrige Maximalpegel von Breitbändern ist durchaus beabsichtigt. Diese Art Lautsprecher ist einfach nicht für hohe Pegel ausgelegt. Schließlich erzeugen hohe Pegel eine stärkere Membranauslenkung und diese verursacht wiederum Modulationsverzerrungen.

Bei den Sprungantworten zeigt sich sehr deutlich der Vorteil eines einzelnen Treibers. Zeit- und Phasenfehler können nicht auftreten. Der Abfall der Sprungantworten ist den Frequenzgängen entsprechend nicht optimal. Dennoch ist das Ausschwingverhalten vorbildlich. Die Sprungantwort des Resolv A8 bescheinigt dem Lautsprecher ein schlechtes Phasen- und Zeitverhalten. Die Membran braucht nach einem Impuls sehr lange bis zu Ruhelage. Diese Defizite haben viele Mehrwegesysteme im unteren Preissegment, allerdings nicht immer in diesem Ausmaß. Im Anhang B2 sind weitere Sprungantworten von anderen Systemen aufgelistet. Auch hier sind meist zwei Sprünge zu sehen. Ein Extremfall wie bei der Samson-Box zeigt sich unter diesen Messungen nur bei dem JBL LSR 32 Lautsprecher. Sind die Lautsprecher jedoch korrekt zeitlich abgestimmt, haben sie ein ähnlich gutes Zeitverhalten wie Breitbandsysteme.

Neben der Sprungantwort gibt es noch eine weitere, einfachere Methode um das Phasenverhalten eines Lautsprechers zu testen. Mit einem Mono-Musik-Signal können sie auf Laufzeitfehler überprüft werden. Hierfür positioniert sich der Hörer in einem gleichseitigen Dreieck vor den Lautsprechern. Das Musiksignal sollte aus der Mitte zwischen den Lautsprechern zu hören sein. Die Lautsprecher selber können im Idealfall hier nicht als Schallquellen wahrgenommen werden. Bei vielen Lautsprechern ist das Monosignal nicht nur aus der Mitte zu hören, sondern es kann auch immer genau bestimmt werden aus welchem Lautsprecher das Signal abgestrahlt wird. Laut der Theorie der Phantomschallquelle, sollten die Lautsprecher selber nicht als Schallquelle wahrnehmbar sein. Eine Phantomschallquelle darf nur aus einer Richtung lokalisiert werden. Sind die Lautsprecher als zusätzliche Schallquellen hörbar, so liegt ein Fehler seitens der Lautsprecher vor.

Die getesteten Breitband-Lautsprecher erzeugen bei diesem Test eine korrekte Phantomschallquellenabbildung. Bei den Samson Lautsprechern erstreckt sich das Klangbild

beinahe kontinuierlich von Lautsprecher zu Lautsprecher. Eine klare Phantommitte ist nicht zu hören.

Neben dem Frequenzgang ist die Zeitrichtigkeit ein sehr wichtiger, aber auch oft vernachlässigter Aspekt bei Lautsprechern. Nur zeitrichtige Lautsprecher geben Tonsignale unverfälscht und naturgetreu wieder. Die Wiedergabe entspricht nur dann dem Original wenn Ein- und Ausgangssignal identisch sind. Der Klang eines Signals ist nicht nur von der Lautstärke der einzelnen Frequenzen abhängig. Die zeitliche Zuordnung der einzelnen Töne ist ebenso relevant. Ein Lautsprecher mit Zeitfehler verändert die zeitliche Zuordnung der einzelnen Töne und verfälscht somit das Signal.

Die getesteten Lautsprecher verfälschen somit alle das Signal. Schwankende Frequenzverläufe und zeitversetzte Wiedergabe einzelner Frequenzen verhindern meist eine unverfälschte Signalreproduktion. Wirklich neutrale Lautsprecher sind in den unteren und mittleren Preissegmenten kaum bis gar nicht zu finden. Die vier eingemessenen Lautsprecher haben alle jeweils Anschaffungskosten von weniger als 500 Euro pro Paar. Die Lautsprecher im ersten Teil von Anhang B haben maximal einen Paarpreis von 1000 Euro. Neutrale Regielautsprecher, die den Anforderungen der EBU Tech genügen, gibt es aller Voraussicht nach nur im oberen Preissegment.

Im Anhang E sind Frequenzmessungen und Klirrfaktoren von zwei hochpreisigen, koaxialen Regielautsprechern zu sehen. Der RL906 und der RL933K haben einen nahezu linearen Frequenzverlauf. Auf Grund ihrer geringen Größe und dem 5 Zoll großen Treiber verliert die RL906 ab 60Hz bereits an Pegel. Für eine Box dieser Größe sind das dennoch sehr gute Werte. Der RL933K entspricht mit diesen Messwerten den Empfehlungen der EBU Tech. 3276. Dieser Lautsprecher hat einen Übertragungsbereich von 35Hz bis 20Khz und hat über den gesamten Verlauf kaum Pegelschwankungen. Das Klirrverhalten ist bei beiden Lautsprechern exzellent. Der RL906 und der RL933K sind mit Stückpreisen ab 1200 bzw. 5000 Euro erhältlich.

Abhörlautsprecher mit neutralem Klangbild und akkurater Tiefbasswiedergabe sind also eine kostspielige Anschaffung. Allerdings ist es wenig ratsam einen Lautsprecher nur anhand niedergeschriebener Studiostandards zu beurteilen. Diese dienen nur einer einheitlich qualitativ hochwertigen Abhörsituation, in den verschiedensten Tonstudios dieser Welt. Sie helfen dabei die Neutralität der Abhörsituation zu optimieren und die Reproduktionen der unterschiedlichsten Signale so wenig wie möglich zu verfälschen. Es ist immer empfehlenswert auch subjektive Klangeindrücke in die Beurteilung von Abhöreinrichtungen einfließen zulassen.

7 Klangbeurteilung

Die Klangbeurteilung eines Lautsprechers ist eine rein subjektive Einschätzung des Rezipienten und keine messbare Größe. Je nach Geschmack und auditiven Fähigkeiten des Rezipienten können Klangeigenschaften unterschiedlich erfasst und beurteilt werden. Die in diesem Kapitel beschriebenen Klangeindrücke entsprechen somit der Wahrnehmung des Verfassers dieser Arbeit und können von denen anderen Rezipienten abweichen.

Für die Klangbeurteilung wurden alle Systeme in einem gleichschenkligen Dreieck ausgerichtet. Zunächst wurden die getesteten Lautsprecher nach Gehör auf eine einheitliche Lautstärke eingeregelt. Getestet wurde mit Musikstücken unterschiedlichen Genres. In den Titeln waren Gesangsstimmen, natürliche Instrumente sowie komplett synthetisch produzierte Klänge enthalten. Der Fostex 6301 wird in diesem Kapitel nicht berücksichtigt.

Die Breitbandlautsprecher haben eine perfekt gezeichnete Phantommitte und eine sehr gute Lokalisationsschärfe. Die Bereiche zwischen Phantommitte und links/rechts sind horizontal deutlich gestaffelt. Dadurch lässt sich das Stereobild gut segmentieren und die Stereoortung einzelner Instrumente erfolgt sehr präzise. Alle Instrumente und Signale sind sauber auf einer horizontalen Ebene angeordnet und durch die gute Tiefenstaffelung lässt sich die räumliche Tiefe einzelner Elemente gut heraushören.

Eine natürlich wirkende Räumlichkeit kann jedoch nicht festgestellt werden. Der Klang der Breitbandsysteme erinnert ein wenig an den charakteristischen Sound von Kopfhörern. Sie klingen sehr direkt und trocken, da hörbare Raumwandreflexionen aufgrund starker Bündelungen ausbleiben. Dadurch hat der Abhörraum auch wenig Einfluss auf die Wiedergabe, was wieder zu einem ungestörten und direkten Schallfeld führt. Wird der ideale Abhörpunkt jedoch verlassen, klingen die Breitbänder schnell dumpf und belegt.

Die Wiedergabe der Höhen klingt immer ein wenig angestrengt und lässt das Ohr schnell ermüden. Hierbei ist die zurückhaltende Höhenwiedergabe der Behritone von Vorteil. Der Klang der Lautsprecher wird durch Membranresonanzen stark eingefärbt. Jeder der Breitbandlautsprecher hat einen anderen Klangcharakter. Durch den beschränkten Frequenzgang, ist bei keinem Breitbandsystem ein Tiefbassfundament zu hören.

Dank ihrer Zeitrichtigkeit haben die Breitbandlautsprecher ein ausgezeichnetes Impulsverhalten und eine detaillierte Transientenzeichnung. Kick-Drums und Hi-Hats klingen sehr sauber und resonanzfrei.

Bei den Behritones und bei den Tang Band Chassis in den Testboxen werden die mittleren Frequenzen gut aufgelöst und detailreich wiedergegeben. Mit seiner feinauflösenden Detailgenauigkeit übertrifft die Testbox sogar den Behritone C50a.

Ohne Entzerrung klingt die Testbox jedoch sehr hell und spitz. Die betonten Mitten und die überpräsenten Höhen strengen die Ohren sehr an. Leicht angewinkelt und mit größerem Abstand zur Abhörposition, klingen sie wesentlich angenehmer. Mit Entzerrschaltung klingt die Testbox sehr ausgewogen und angenehm. Der Sweetspot ist wesentlich größer als bei den anderen Breitbändern.

Der Behritone Lautsprecher klingt unspektakulär und zurückhaltend. Nach einer kurzen tonalen Eingewöhnungsphase zeichnen sich jedoch seine klanglichen Vorzüge und die breitbändertypischen Eigenheiten ab. Die Box hat deutlich weniger Höhen und kaum tieffrequente Klanganteile. Wird versucht die fehlenden Tiefen mit einem Equalizer auszugleichen, werden diese deutlich verzerrt. Unabhängig davon klingen Stimmen sehr natürlich und überzeugen mir einer ausgezeichneten Sprachverständlichkeit. Der Behritone Lautsprecher hat im Testfeld den kleinsten Sweetspot.

Die Samson Resolv A8 haben ein recht ausgewogenes Klangbild. Der breitere Übertragungsbereich ermöglicht einen volleren und angenehmeren Klang im Vergleich zu den Breitbändern. Allerdings verhindert der betonte Bassbereich eine neutral klingende Wiedergabe. Bei hohen Lautstärken neigt die Box zum Dröhnen. Die genaue Lokalisation einzelner Elemente fällt schwer und eine deutliche Tiefenstaffelung kann nicht wahrgenommen werden. Die Auflösung und Transparenz in den mittleren Frequenzen ist in Ordnung.

Der RL906 von ME Geithain klingt sehr neutral und ausgewogen. Die Musik wird nahezu verfärbungsfrei und unverfälscht wiedergegeben. Trotz seiner geringen Ausmaße, verfügt er über einen sauberen und präzisen Bass. Bezüglich der Phantommitte und der Lokalisationsschärfe ist der RL906 den Breitbandsystemen ebenbürtig. Bei der räumlichen Darstellung und Tiefenstaffelung werden die Breitbänder sogar deutlich übertroffen. Die Transientenzeichnung und Impulswiedergabe gibt ebenfalls keinen Anlass zur Kritik. Die beiden RL906 besitzen keinen färbenden Eigenklang und werden als Schallquellen nicht wahrgenommen. Das Gleiche gilt auch für den RL933K. Dieser Regielautsprecher hat einen noch feiner aufgelösten Frequenzverlauf mit wesentlich mehr Tiefbass. Bei Koaxiallautsprechern werden die Chassis nicht einzeln auf der Schallwand verteilt, sondern bilden ein gemeinsames akustisches Zentrum. Hierfür befinden sich die Hochtöner und ggf. Mitteltöner zentral vor den Tieftonchassis.

8 Breitbandssysteme in der Studiopraxis

Breitbandlautsprecher können eine vollwertige Studioabhöre nicht ersetzen. Dennoch können sie bei Mischprozessen sehr hilfreich sein. Regulär dienen sie der Kontrolle des Klangverhaltens in qualitativ unzureichenden Abhörumgebungen. Der sehr kleine Sweetspot von Breitbandsystemen kann im Mischalltag problematisch werden, da er nur geringe Kopfbewegungen zulässt. Außerdem ist dadurch die Abhörposition sehr dicht an den Monitoren. Bei der zusätzlich geringen Abhörlautstärke ist der Raumeinfluss auf den Klang natürlich sehr gering. Dieser geringe Raumeinfluss verbessert wiederum die bereits sehr gute Lokalisationsschärfe.

Mit Breitbandsystemen lässt sich eine Mischung auch bei moderaten Lautstärken sehr gut beurteilen und die Bearbeitung von Einzelspuren geht leicht von der Hand. Mit ihrem begrenzten Wiedergabebereich sind sie ideal um einen Mix in Grenzsituationen beurteilen zu können. So kann die Radiotauglichkeit eingeschätzt und die Monokompatibilität geprüft werden. Für den Mono-Test einer Mischung sind Breitbänder deshalb gut geeignet, da mögliche Phasenfehler und -auslöschungen besonders deutlich auffallen.

Für den Dynamikumfang einer Mischung lassen sich die Lautstärkeverhältnisse der lauten und leisen Signalanteile sehr gut dosieren. Der richtige Grad der Kompression ist schnell gefunden, denn ein zu stark verdichtetes Signal fällt sehr negativ auf. Je nach Stärke des Kompressionseinsatzes lässt sich auch eine schöne Tiefe in der Mischung erzeugen. Instrumente können so realitätsnah vor- und hintereinander positioniert werden. Dabei kann auch schnell festgestellt werden ob ein Kompressor pumpt oder nicht.

Dank der sehr guten Lokalisation lassen sich Hallparameter und Delays einfach und offensichtlich einstellen und es wird auch schnell klar wann einer Audiospur zu viel Hall hinzugemischt wurde. Die Abbildung einzelner Instrumente und die kontrollierte Effektdosierung funktionieren hervorragend.

Der kritische Frequenzbereich der mittleren Frequenzen dominiert das Klangbild. Zusätzlich sind diese Frequenzen sehr fein aufgelöst und gestaffelt. Bei Zweiwegesystemen hat die Frequenzweiche hier ihre Trennfrequenz. Ein Studiomonitor mit schlechtem Übergangsverhalten zwischen Mittel- und Hochtöner klingt im Bereich der Trennfrequenz immer unsauber und undefiniert. Der Grundton von Keyboardsounds, Vocals und Gitarren besitzt hauptsächlich Frequenzen in diesem Bereich. Bei Breitbandsystemen werden die Mitten im Mischvorgang mehr beachtet und differenzierter gemischt. Dank der ausgezeichneten Stimmenabbildung ist deutlich zu hören wenn Vocals mit den Instrumenten konkurrieren oder sich gar gegenseitig maskieren. Der optimale Platz für Vocals und Instrumente im Mix, ist somit schnell gefunden.

Präsente Bässe und brillante Höhen können viel kaschieren, denn mit einer Betonung dieser Frequenzen klingt ein Mix schnell besser. Durch ihre straffen Membranen und kleinen geschlossenen Gehäusen geben Studiobreitbänder so gut wie keine Bässe wieder. Dadurch ergibt sich ein entscheidenderer Vorteil, der den Mischprozess von Audio-material enorm vereinfacht. Die Mitten und Höhen werden nicht mehr so stark von den Bässen verdeckt und können dadurch besser beurteilt werden.

Im Mischprozess ist die Verdeckung (auch Maskierung) ein Effekt gegen den der Toningenieur die meisten Eingriffe vornehmen muss. So kann ein zu lauter Bass Frequenzbereiche von Vocals verdecken und sie weniger präsent klingen lassen. Der Verdeckungseffekt wird in der Psychoakustik sehr ausführlich beschrieben. Er besagt, dass ein lautes Signal in einem bestimmten Frequenzbereich nicht nur leisere Signale desselben Frequenzbereiches verdeckt, sondern auch Signale benachbarter Frequenzen. In der Praxis verdeckt also ein zu lauter Bassanteil mittlere Frequenzbereiche und sorgt dafür, dass die Mitten weniger gut wahrgenommen werden. Für einen transparenten und ausgewogenen Mix ist jedoch gerade der mittlere Frequenzbereich wichtig. Wird mit zu viel Bass abgehört, erscheint der Klang der Mitten zu schnell zufriedenstellend. Die eigentlichen Problemzonen im mittleren Frequenzbereich werden von den zu laut wiedergegebenen Bässen verdeckt. Erst wenn der Bass mit einem EQ/Filter weggefiltert oder gar nicht erst wiedergegeben wird, werden die unfertig gemischten Mitten deutlich zu hören sein.

Ein regelmäßiges Umschalten zur Hauptabhöre ist dennoch nötig, da sonst eine Fehleinschätzung der Hoch- und Tieftonanteile zu Überbetonungen an beiden Enden des Frequenzspektrums führt.

Angesichts des eher unspektakulären Grundklangs der Breitbandlautsprecher ist ein ausgewogener und voller Klang kaum vorstellbar. Dennoch ist es möglich einen Mix auf diesen Lautsprechern umgangssprachlich „fett“ klingen zu lassen. Ist dies auch bei höheren Abhörlautstärken geschafft, sind nur noch wenige Produktionsschritte bis zur finalen Mischung nötig. Mit einem nachbearbeiteten Bassbereich und gut dosierten Höhen sollte der finale Mixdown auf fast allen Lautsprechern bestehen können.

Für all die aufgezählten Disziplinen sind die Breitbandlautsprecher im klassischen Auratone-Design bestens geeignet. Bei den Fostex 6301 sind die hierfür wichtigen Mitten zu schwach ausgeprägt. Die Testbox klingt für diesen Zweck zunächst zu gut, trotzdem ist diese Arbeitsweise auch mit ihr möglich. Bei korrekt abgestimmten Mehrwegesystemen ist der Einsatz von Breitbändern nicht nötig, da sie dieselben klanglichen Vorzüge aufweisen. Um gegen mögliche Verdeckungen vorzugehen reicht hier meist die Einschränkung des Frequenzganges mit einem Hard- oder Software-EQ.

9 Schlussbetrachtungen

Bei der Betrachtung der Einschränkungen, die ein Breitbandsystem mit sich bringt, wird schnell klar wieso sich Mehrwegesysteme durchsetzen konnten. Die Konstruktionsform von Lautsprechern mit nur einer Membran hat im Vergleich mit Mehrwegesystemen klare Vorteile aber auch Einschränkungen, die sie als Hauptabhöre disqualifizieren. Deshalb sind sie Hauptabhöre nicht zu gebrauchen und für diesen Zweck waren sie auch nie gedacht. Effekteinsätze und Lautstärkeverhältnisse lassen sich zwar gut beurteilen, allerdings sind bestimmte Frequenzen immer betonter als andere und die Einschränkungen im wiedergebenden Frequenzspektrum verhindern eine richtige Einschätzung des Klangbildes einzelner Elemente und deren Gesamtheit.

Hochtöner können keine Tieftonsignale verarbeiten. Diese können das Chassis sogar zerstören. Tieftöner können aufgrund ihrer Masse keine schnellschwingenden Hochtonsignale abstrahlen. Bei Breitbandlautsprechern wird jedoch beides versucht. Somit ist die Signalwiedergabe mit Breitbandlautsprechern immer kompromissbehaftet. Breitbandlautsprecher sind zu verzerrungsanfällig für tiefe Frequenzen und zu schwer und träge für hohe Frequenzen. So ist die Mitteltonwiedergabe zwar ausgezeichnet, dafür ist die Hoch- und Tieftonwiedergabe aber immer grenzwertig. Für tiefe Frequenzen fehlt es meist an ausreichender Membranfläche oder am Maximalhub der Membran. Für hohe Frequenzen wird durch die Massenträgheit der Membran, eine zufriedenstellende Wiedergabe verhindert. Zusätzlich entstehen durch stärker auftretende Membranresonanzen auffällige Unregelmäßigkeiten im Verlauf der hohen Frequenzen. Deshalb werden bei Mehrwegesystemen die Frequenzen auf die jeweiligen Treiber aufgeteilt, die für sie am besten geeignet sind. Diese Aufgabe übernimmt die Frequenzweiche.

Bei günstigeren Abhörlautsprechern wird meist bei der Qualität der Frequenzweiche gespart. Ist dies der Fall, eignen sich die klanglichen Vorzüge von Breitbandlautsprechern bestens dafür, die auftretenden Wiedergabefehler zu kompensieren. Breitbandlautsprecher haben genau in den Bereichen ihre Stärken, in denen günstige Mehrwegesysteme zu Wiedergabefehlern neigen. Breitbandlautsprecher können durchaus sehr gut klingen, dennoch haben sie immer einen stark färbenden Klangcharakter, der sich auch mit aufwendigen Schaltungen kaum entzerren lässt. Ein neutrales und homogenes Klangbild ist mit Breitbandlautsprechern nicht zu realisieren. So verhindert die Physik die Konstruktion eines Breitbandlautsprechers, der seine klanglichen Vorteile ausspielen kann und dabei ein genügend breites Frequenzspektrum wiedergibt.

Für tiefe Bässe und brillante Höhen haben sich komplexere Mehrwegesysteme etabliert. Mit qualitativ hochwertigen Schaltungen und Filtern, sowie perfekt abgestimmtem Zeitverhalten und/oder koaxialer Bauweisen, ist es möglich auch bei Mehrwegesystemen die klanglichen Vorzüge von Breitbandlautsprechern zu realisieren. Koaxialsysteme haben durch ihre spezielle Treiberanordnung ebenfalls einen Punktschallquellencharakter.

Wird bereits eine hochwertige Abhöre eingesetzt, kann auf Breitbänder verzichtet werden. Mit einem Lowcut bei 200Hz und einem Highcut bei 5kHz bis 8kHz lassen sich mit Mehrwegesystemen ebenfalls Verdeckungseffekte lokalisieren und bearbeiten.

Mit der Testbox ist es gelungen einen Breitbandlautsprecher zu bauen, der die auf dem Markt verfügbaren Modelle übertrifft. Die Testbox erzeugt ein breiteres Frequenzspektrum. Mit dieser Konstruktionsform ist es aber kaum möglich tiefere Frequenzen wiederzugeben. Eine geschlossene Box mit 20 Litern Volumen und einem 8 Zoll großen Treiber erreicht nur eine unwesentlich niedrigere Grenzfrequenz (Anhang D6). Die Auflösung und Detailzeichnung ist besser als bei den anderen Studiobreitbändern, allerdings ist ihr Klang im Nahfeld nur im entzerrten Zustand erträglich. In einer geöffneten Gehäusekonstruktion könnte eine tiefere untere Grenzfrequenz ermöglicht werden. Die Welligkeit in den Höhen jedoch bleibt.

Literaturverzeichnis

Print

Boche, Christian: Kleinlaut? Behringer „Behritone C-5A und C-50A Nahfeldmonitore, in: tools4music, 03(2012), S 42-44.

Dickreiter, Michael u.a.: Handbuch der Tonstudioteknik, 7. völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, München 2008.

Friesecke, Andreas: Die Audio-Enzyklopädie. Ein Nachschlagewerk für Tontechniker, München 2007.

Friesecke, Andreas: Brüllwürfel reloaded. Warum kleine Full-Range-Speaker nicht zu unterschätzen sind, in: Recording Magazin, 04(2012), S. 40-45.

Friesecke, Andreas: Studio Akustik. Konzepte für besseren Klang, 4. Auflage, Bergkirchen 2013.

Görner, Thomas: Tontechnik. 2., aktualisierte Auflage, München 2008

Hausdorf, Friedemann: Handbuch der Lautsprechertechnik. Grundlagen und Know-how des Lautsprecherbaus, 8. Auflage, Haan 2013.

Heß, Rober: Berechnung von geschlossenen Lautsprecherboxen. Hamburg 2004

Klang + Ton: 5 aktuelle Wandler im K+T-Labor, in: Klang + Ton, 05(2008), S. 51

Küster, Jörg: Report: Interview mit dem erfolgreichsten deutschen Produzenten 2006 Patrik Majer, in: Sound & Recording, 09(2006), S 42.

PR Newell u.a. (Hrsg.): The Yamaha NS10M: Twenty Years a Reference Monitor, o.O. 2001.

Senior, Mike: Mixing Secrets. Perfektes Mischen im Homestudio, Heidelberg u.a. 2012.

Stark, Berndt: Lautsprecher-Handbuch. Theorie und Praxis des Boxenbaus, 7., völlig neu bearbeitete Auflage, München 1999.

Web

Auratone LLC (Hrsg.): Auratone, o.J., in: www.auratonesoundcubes.com (Zugriff am 22.05.2014)

Avantone Pro (Hrsg.): Mixcube Monitors, o.J., in: <http://www.avantonepro.com/Avantone-Passive-MixCube-Monitors-In-Black.html> (Zugriff am 11.06.2014)

Bonedo (Hrsg.): Testmarathon Aktive Nahfeldmonitore bis 1000,- EUR das Paar. 12 Budget-Lautsprecher im Vergleichstest, 12.01.2012, in: <http://www.bonedo.de/artikel/einzelansicht/testmarathon-nahfeldmonitore-bis-1000-eur.html> (Zugriff am 14.05.2014)

Georg Neumann GmbH (Hrsg.): M 52 - Aktiver Control-Monitor, technische Daten, o.J., in: http://www.neumann-kh-line.com/neumann-kh/home_de.nsf/root/prof-monitoring_studio-monitors_control-monitors_M52 (Zugriff am 22.05.2014)

Icy-Medien GmbH (Hrsg.): Frequenzweichen, vom Anfänger zum Profi (Teil1). 20.07.2007, in: http://www.hifi-selbstbau.de/index.php?option=com_content&view=article&id=162:frequenzweichen-vom-anfer-zum-profi-teil1&catid=34:frequenzweichen&Itemid=68 (Zugriff am 14.05.2014)

K&K GmbH (Hrsg.): Klang und Ton - 25 Jubiläum, 2011, 17.10.2011, in: <http://www.hifi-forum.de/viewthread-104-22928-2.html> (Zugriff am 18.06.2014).

Kirchner elektronik (Hrsg.): Schallwand und Waveguide im Vergleich. 2007, in: <http://www.kirchner-elektronik.de/upload/7478097-Schallwand--Waveguide.pdf> (Zugriff am 04.04.2014)

Kirchner elektronik (Hrsg.): Photostory. 2007, in: <http://www.kirchner-elektronik.de/~kirchner/photostory.pdf> (Zugriff am 04.04.2014)

Kirchner elektronik (Hrsg.): Zeitrichtig, was ist das? 2007, in: <http://www.kirchner-elektronik.de/~kirchner/Zeitrichtig.pdf> (Zugriff am 04.04.2014)

Martin J. King (Hrsg.): Simple Sizing of the Components in a Baffle Step Correction Circuit. 23.07.2005, in: http://www.quarter-wave.com/General/BSC_Sizing.pdf (Zugriff am 04.04.2014)

ME-Geithain (Hrsg.): Aktive Lautsprecher, o.J., in <http://www.me-geithain.de/index.php/de/studio/produkte/aktiv-lautsprecher> (Zugriff am 07.06.2014)

MUSIC Group IP Ltd. Behringer (Hrsg.): Behringer Behritone C5A. o.J., in: <http://www.behringer.com/EN/Products/C5A.aspx> (Zugriff am 11.06.2014)

Proxenos GmbH/Amazona (Hrsg.): Test: Avant Electronics Avantone Mixcubes, 01.09.2008, in: <http://www.amazona.de/test-avant-electronics-avantone-mixcubes/> (Zugriff am 21.05.2014)

TMR Elektronik GmbH (Hrsg.): Das Hören. Summenlokalisationseffekt, 2013, in: <http://www.tmr-audio.de/homemain/wissenswertes-ueber-hifi/faq/das-hoeren/151-summenlokalisationseffekt> (Zugriff am 25.03.2014).

True Audio (Hrsg.): Loudspeaker Diffraction Loss and Compensation. 20.06.2000, in: http://trueaudio.com/st_diff1.htm (Zugriff am 04.04.2014)

VISATON GmbH & Co. KG (Hrsg.): Bedämpfung von Gehäusen, o.J., in: http://www.visaton.de/de/techn_grundlagen/pc_bedaempfung.html (Zugriff am 12.05.2014)

VISATON GmbH & Co. KG (Hrsg.): Solo 20, o.J., in: <http://www.visaton.de/de/bauvorschlaege/breitband/solo20/index.html> (Zugriff am 12.05.2014)

zz-netz.de (Hrsg.): HIFI-Selbstbau – Gründe für Aktivierung, 01.02.2009, in: http://www.zz-netz.de/elektronik/DIY_hifi-highend.html (Zugriff am 01.03.2014).

Standards

DIN EN 60094-1. Systeme für Tonaufzeichnung und -wiedergabe auf Magnetband. Teil 1: Allgemeine Bedingungen und Anforderungen. Berlin, 1994.

EBU [Tech3276] - 2nd edition. Listening conditions for the assessment of sound programme material: monophonic and two-channel stereophonic. 1998.

ITU-R [BS.1116-1]. Methods for the subjective assessment of small impairments in audio systems including multichannel sound systems. 1994-1997

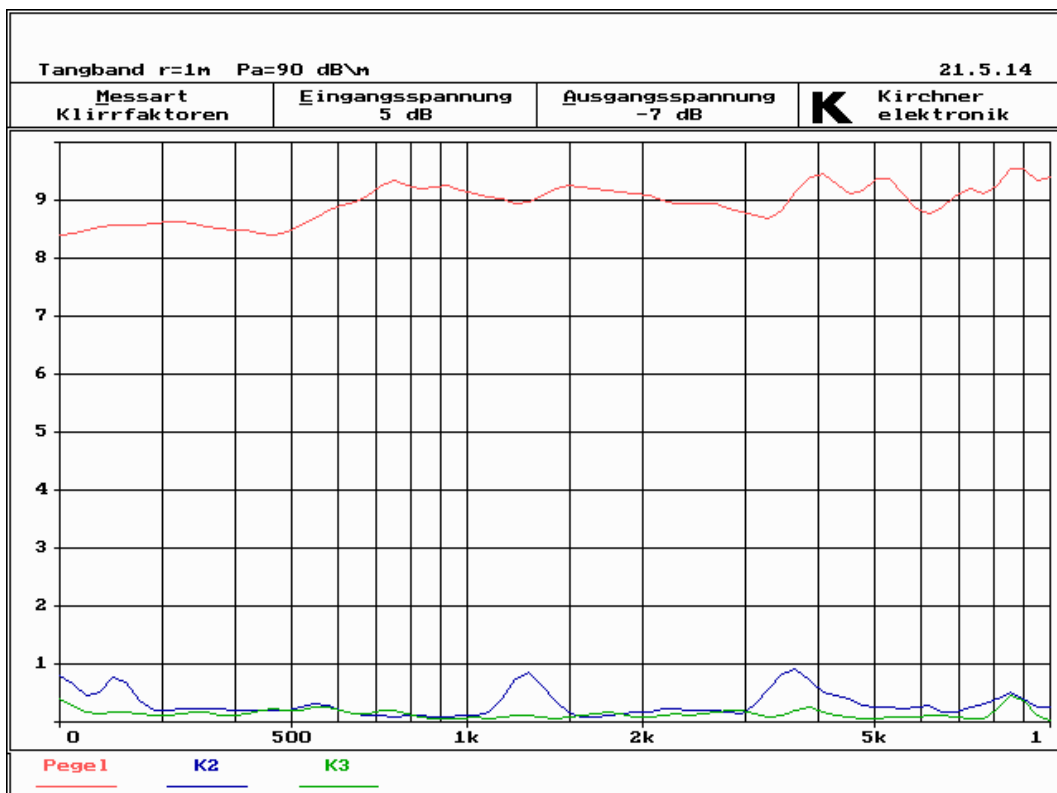
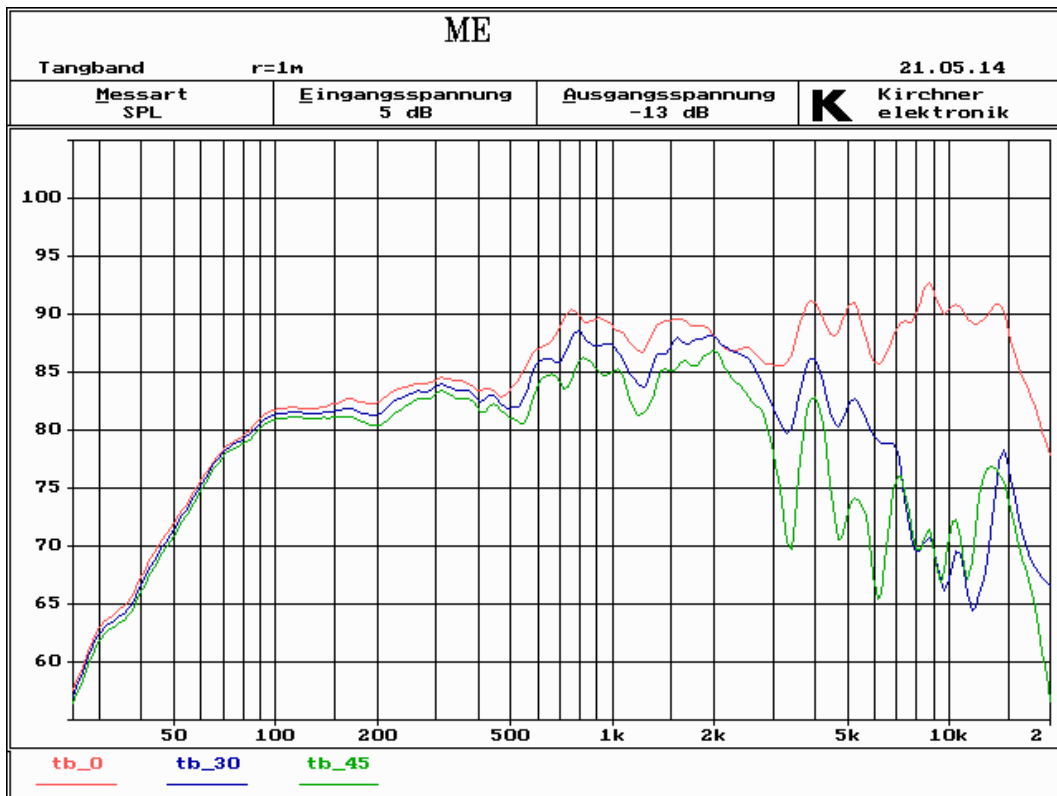
Anhang

A	eigene Messungen	1
A.1	Amplitudenfrequenzgang 0°; 30°; 45°; Klirrmessung.....	1
	Tang Band W5-1611SA (Testbox)	1
	Behringer Behritone C50a.....	2
	Fostex 6301B.....	3
	Samson Resolv A8.....	4
A.2	Sprungantwort.....	5
	Tang Band W5-1611SA (Testbox)	5
	Samson Resolv A8.....	6
	Behringer Behritone C50a und Samson Resolv A8	7
	Fostex 6301B und Samson Resolv A8	7
A.3	Baffle-Step-Korrektur der Testbox (simuliert)	8
B	Weitere Messungen.....	9
B.1	Amplitudenfrequenzgang 0°; 45°; Klirrmessung	9
B.2	Sprungantworten.....	24
C	W5-1611SA Daten und Referenzmessungen.....	26
C.1	Frequenz- und Impedanzverlauf von Tang Band.....	27
C.2	W5-1611SA in 1000-Liter-Testbox mit 1,35 x 1,65 m IEC-Normwand	27
D	Frequenzgänge verschiedener Studiobreitbänder	28
D.1	Auratone 5C – Übertragungsverlauf und Klirr	28
D.2	Auratone 5C – Sprungantwort	28
D.3	Avantone Mixcube – Übertragungsverlauf und Klirr.....	29
D.4	Neumann M52 – Übertragungsverlauf.....	29
D.5	Behringer Behritone C5a; C50a; Auratone 5C – Vergleich	30
D.6	Visatone SOLO 20 (HiFi-Bausatz) – Übertragungsverlauf.....	30
E	Regielautsprecher von Musikelectronic Geithain	31
E.1	RL906	31
E.1	RL933K.....	31

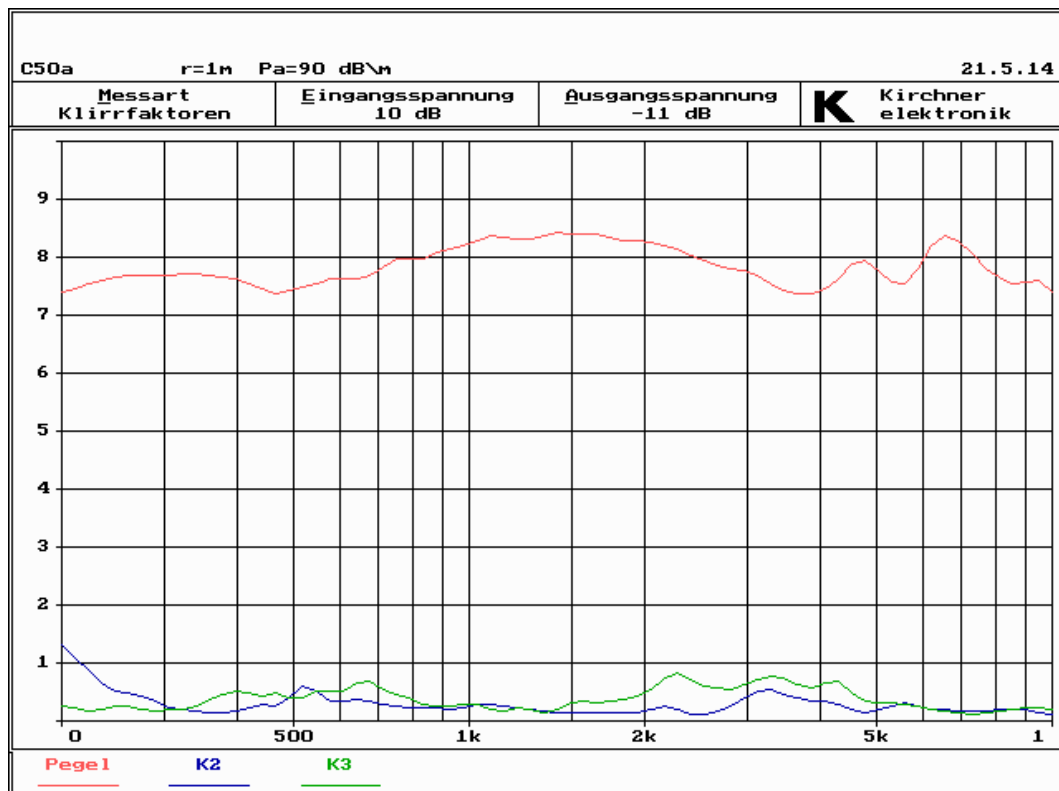
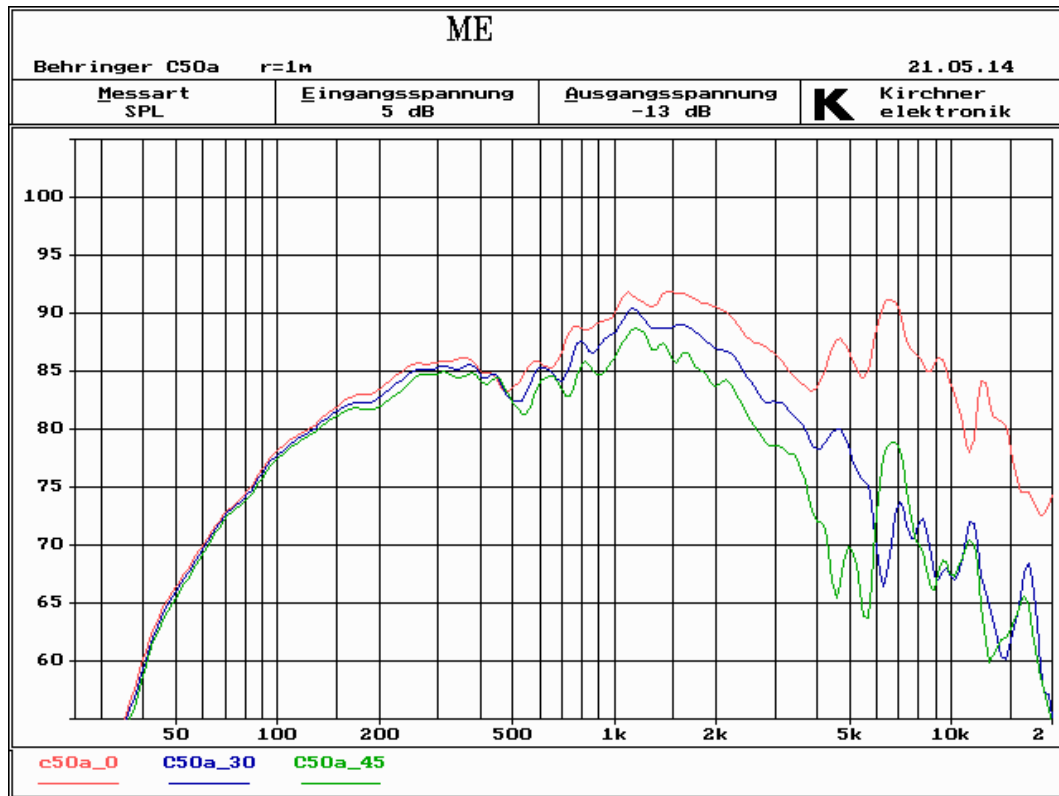
A eigene Messungen

A.1 Amplitudenfrequenzgang 0°; 30°; 45°; Klirrermessung

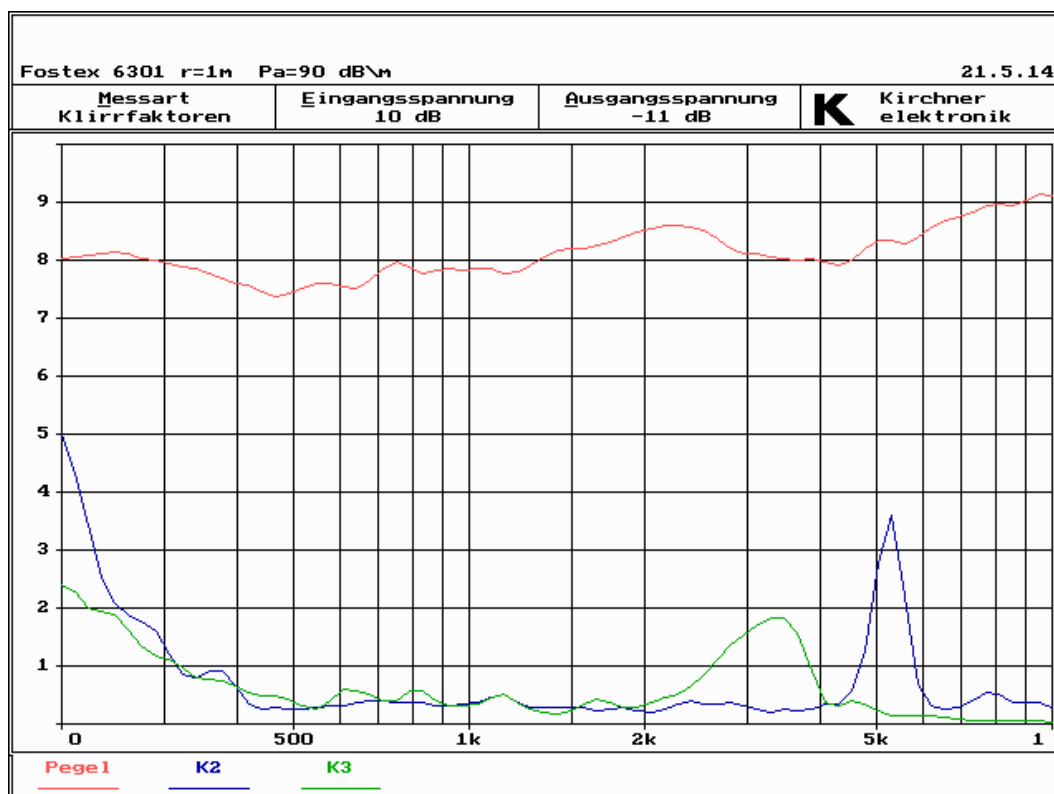
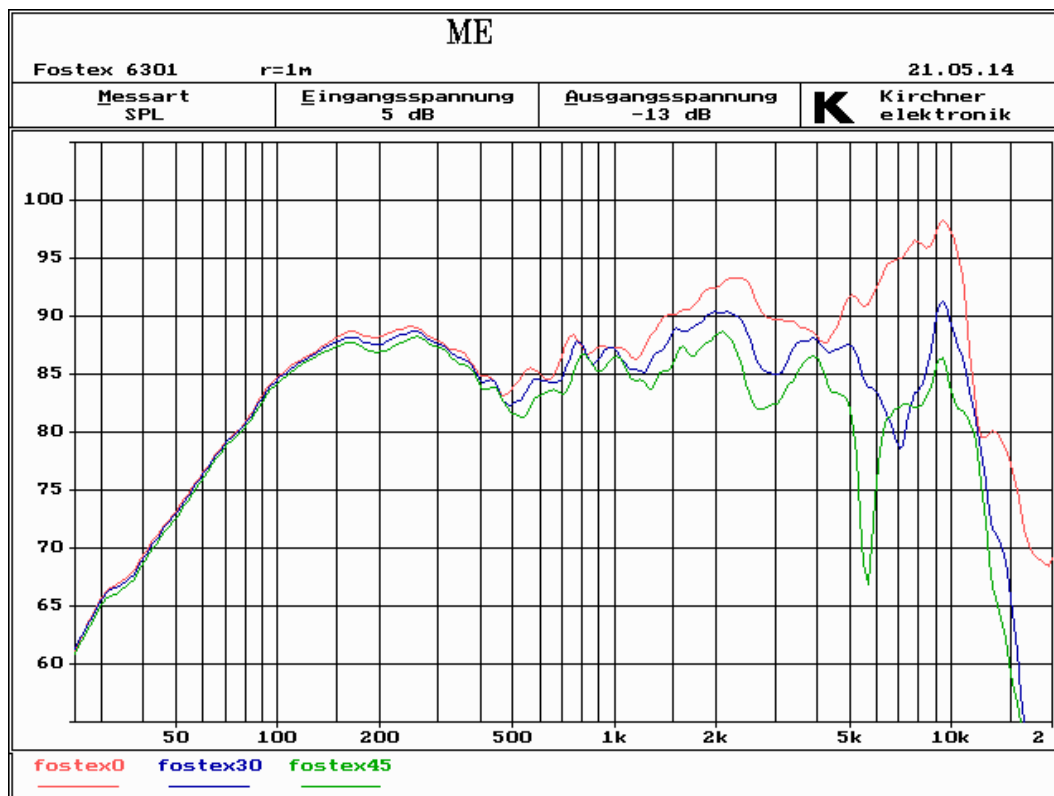
Tang Band W5-1611SA (Testbox)



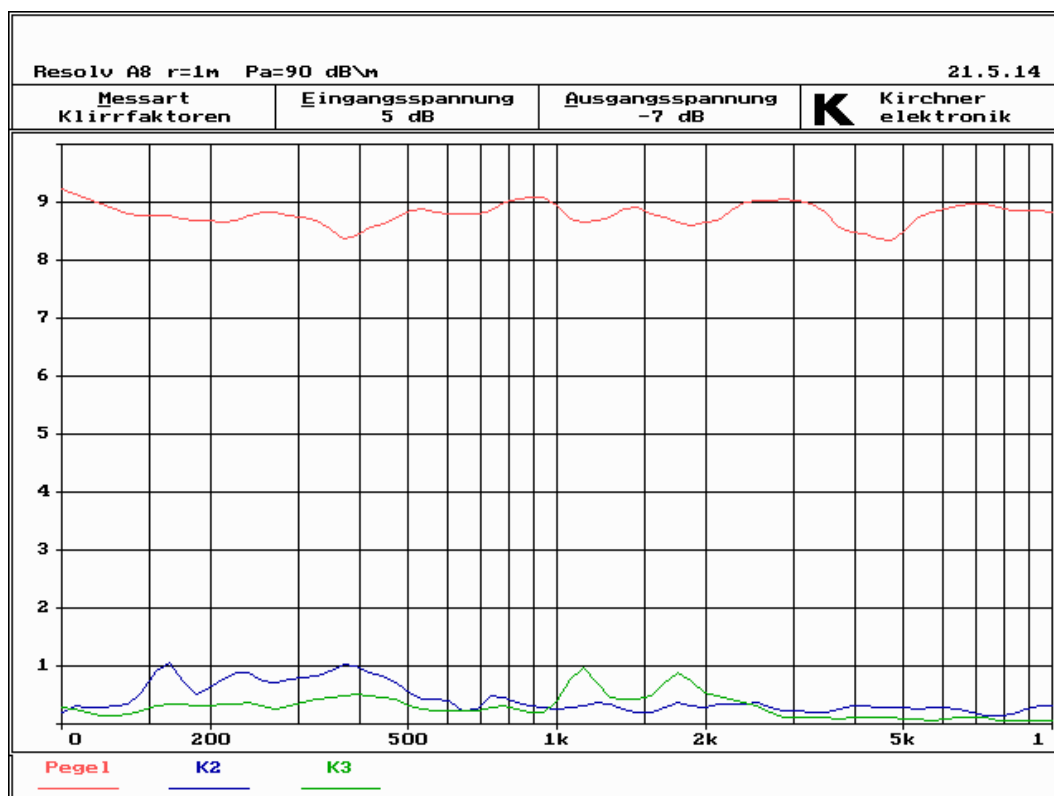
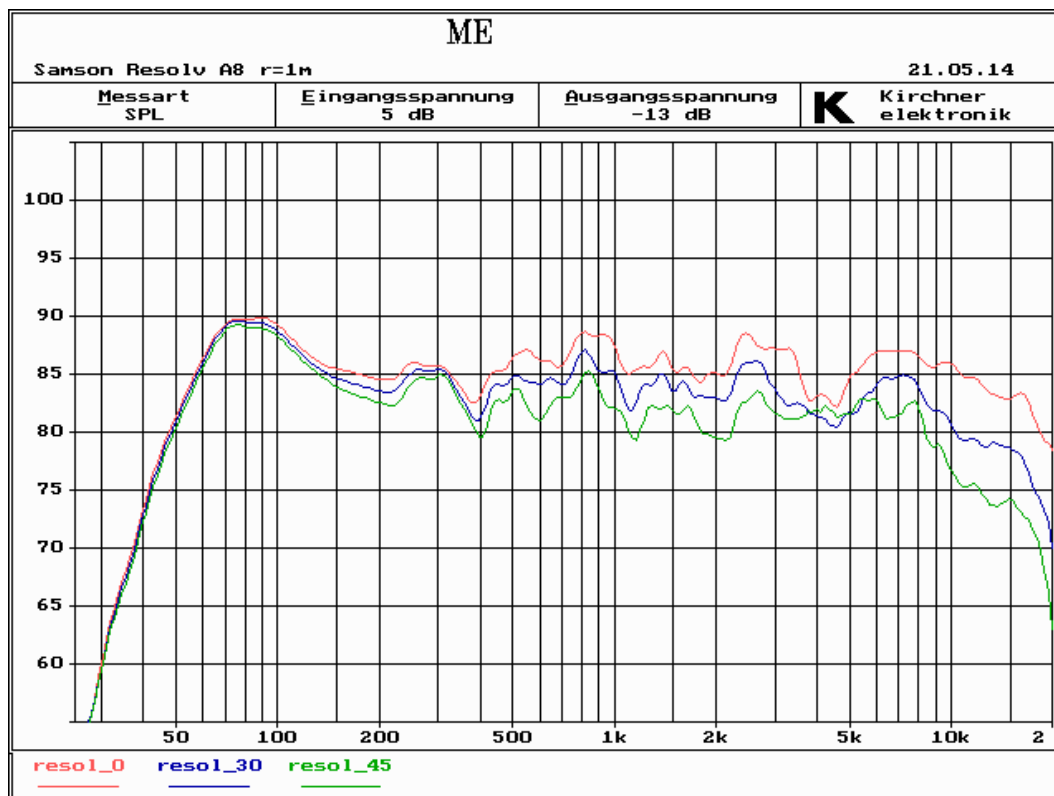
Behringer Behritone C50a



Fostex 6301B

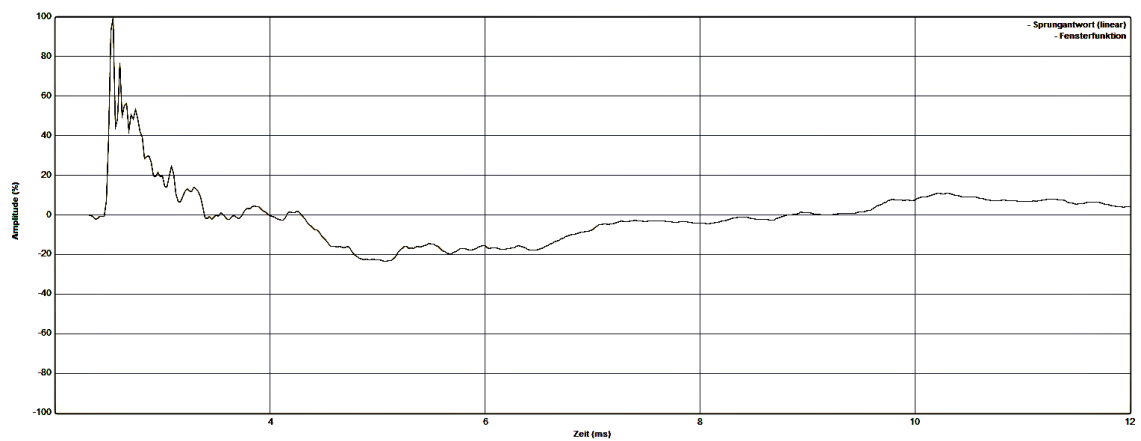
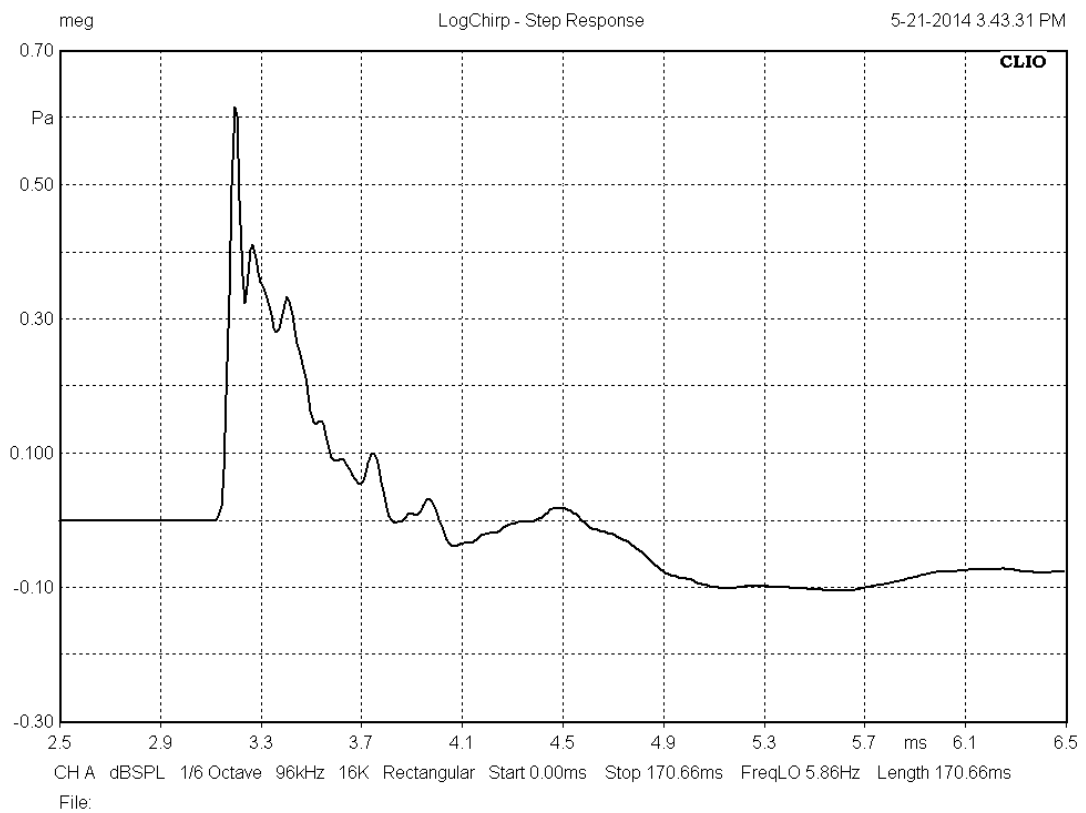


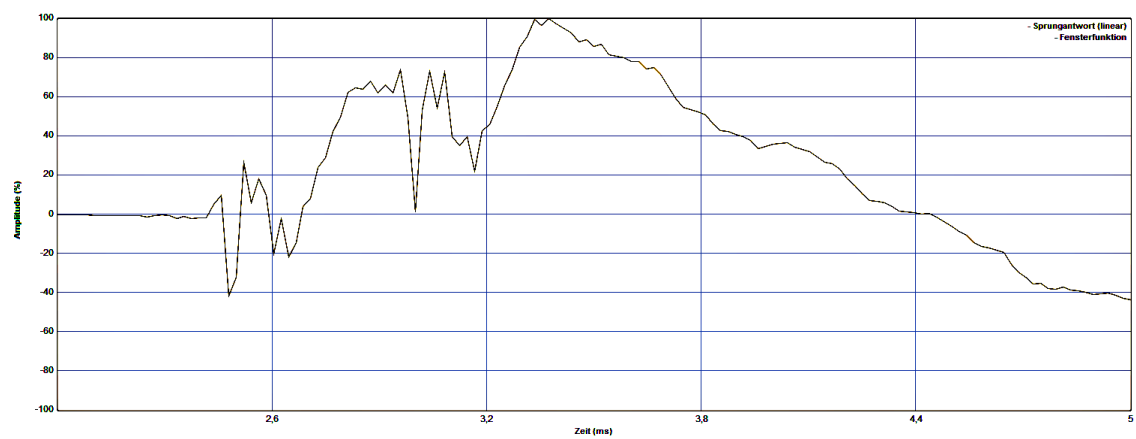
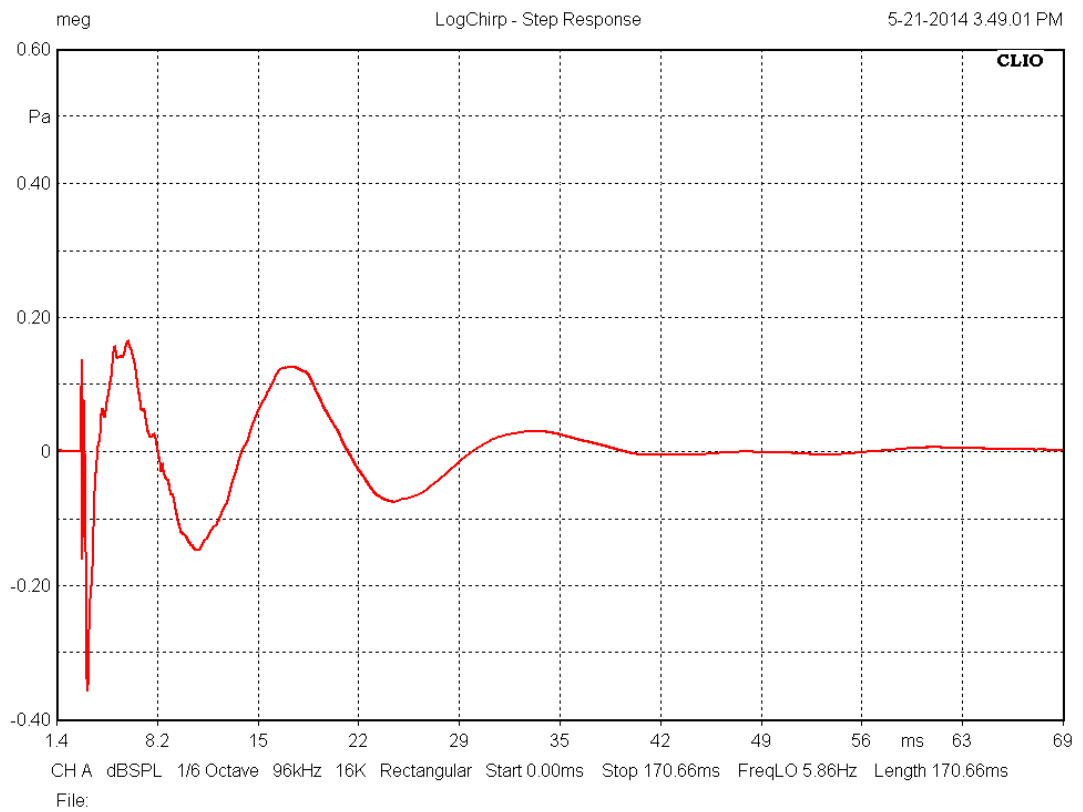
Samson Resolv A8



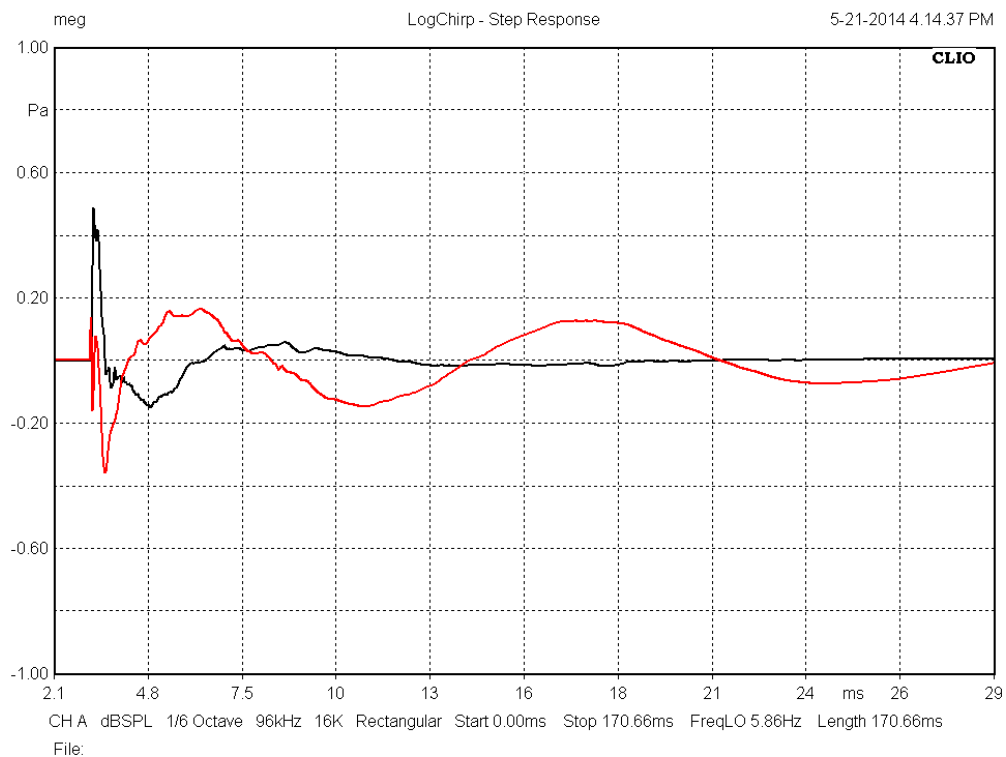
A.2 Sprungantwort

Tang Band W5-1611SA (Testbox)

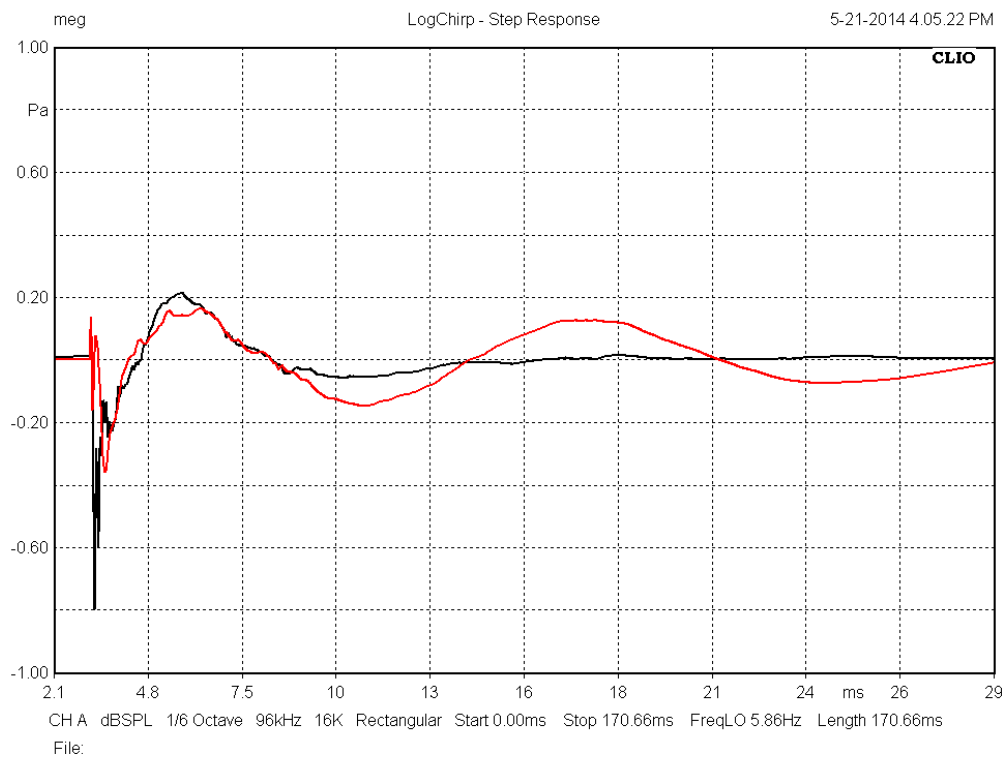


Samson Resolv A8

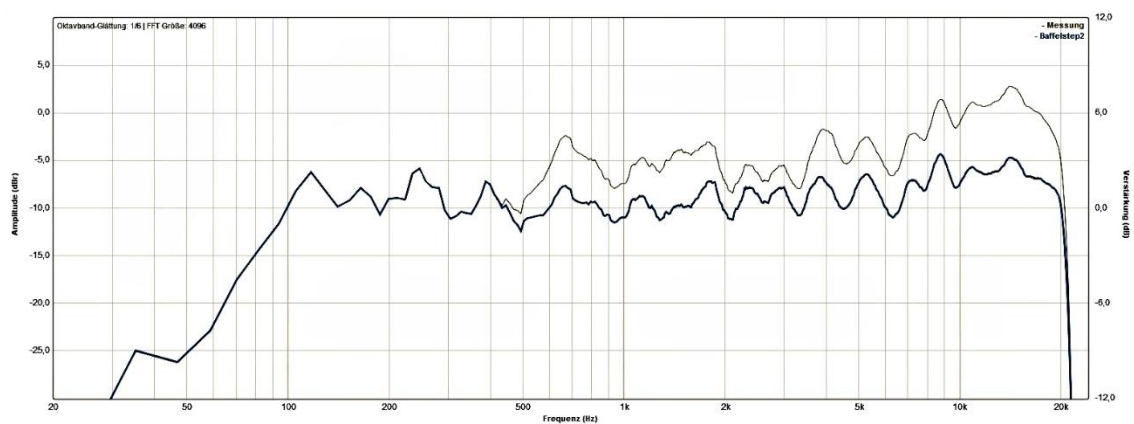
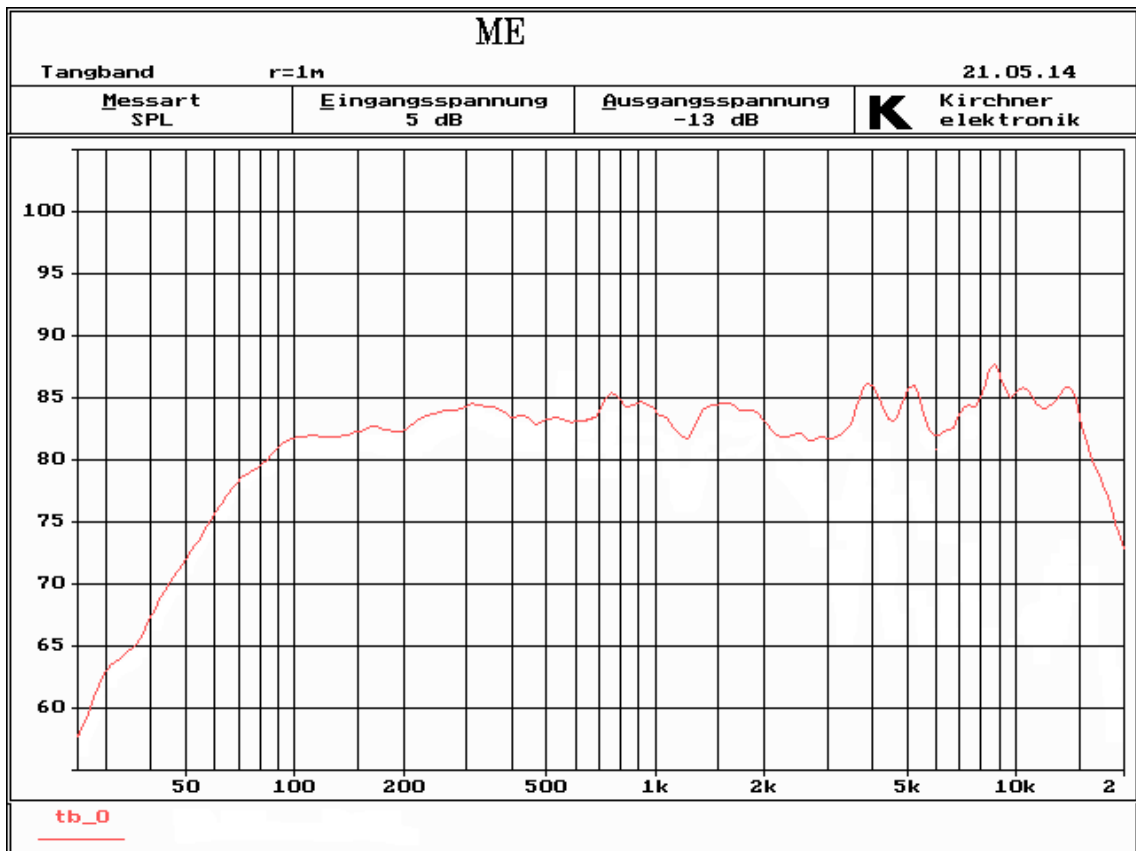
Behringer Behritone C50a und Samson Resolv A8



Fostex 6301B und Samson Resolv A8

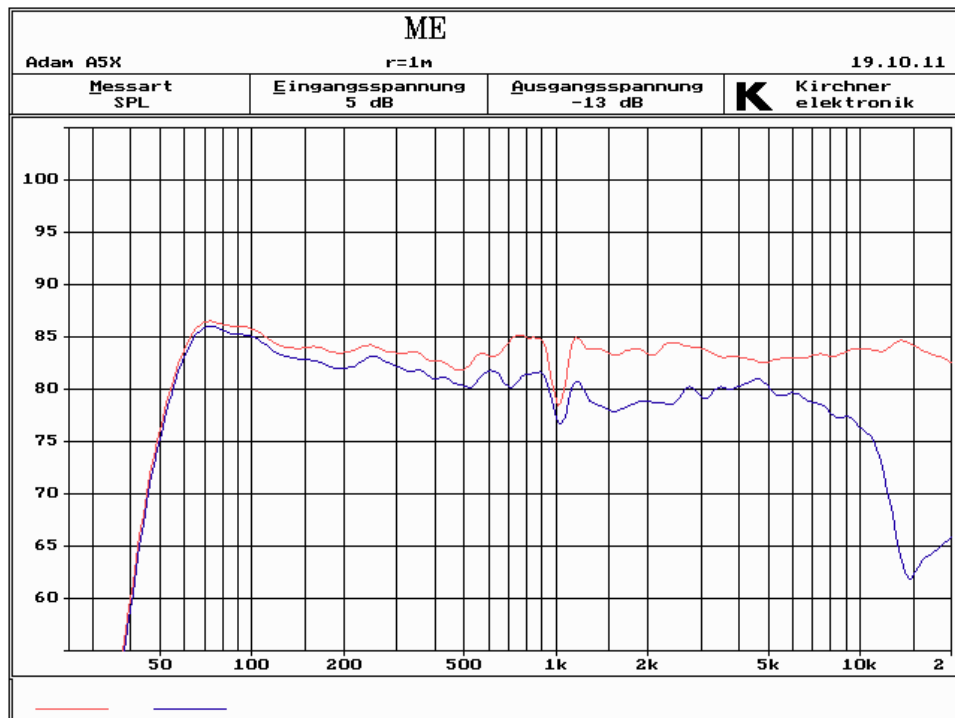


A.3 Baffle-Step-Korrektur der Testbox (simuliert)

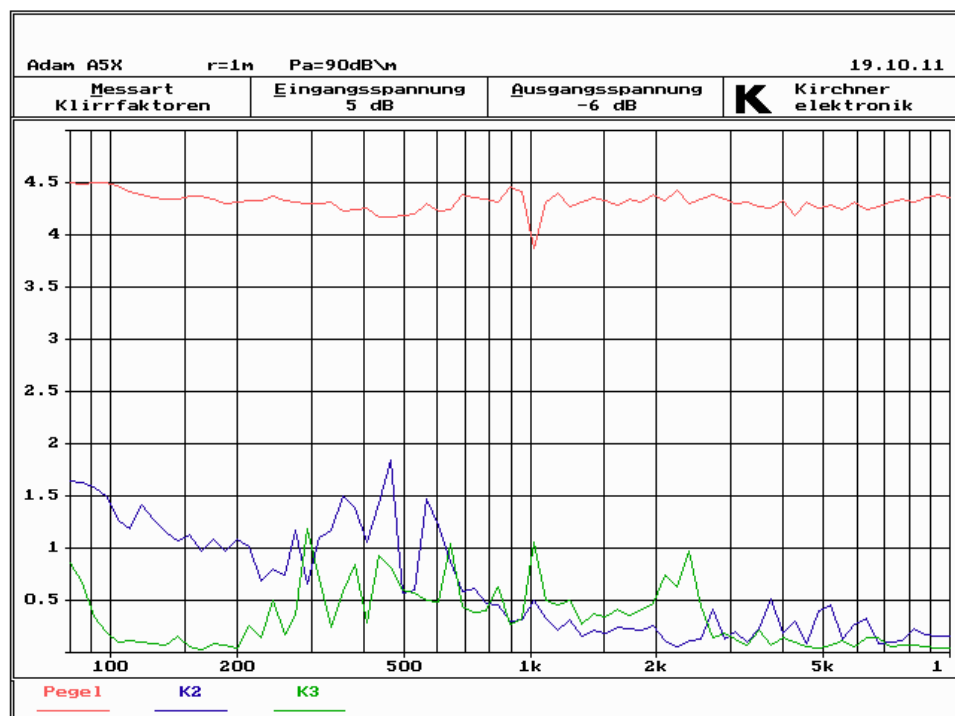


B Weitere Messungen

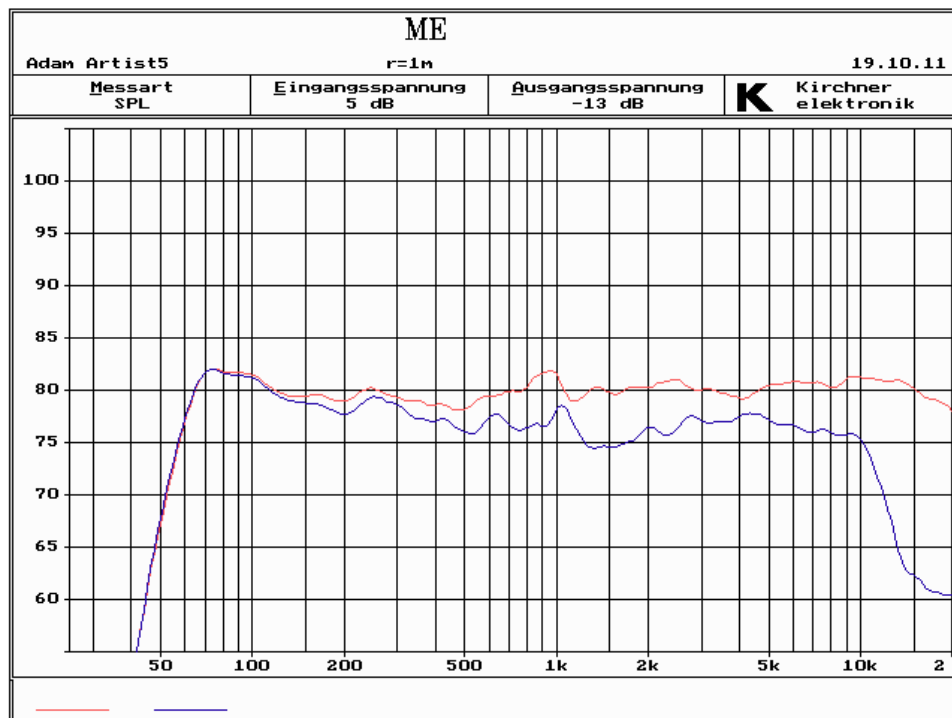
B.1 Amplitudenfrequenzgang 0°; 45°; Klirrmessung



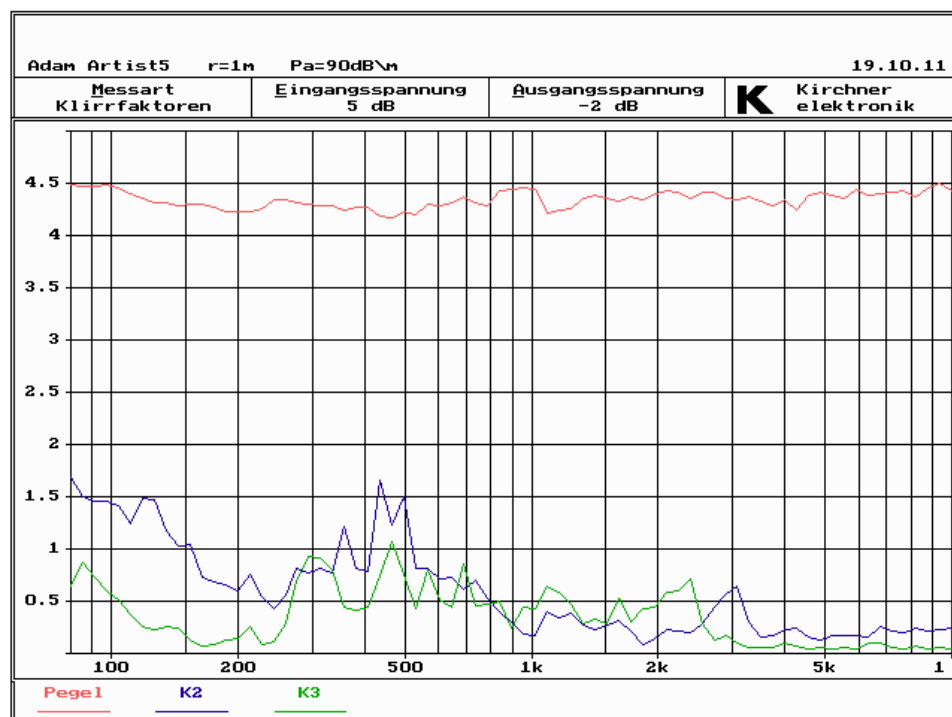
ADAM A5X - Übertragungsverlauf

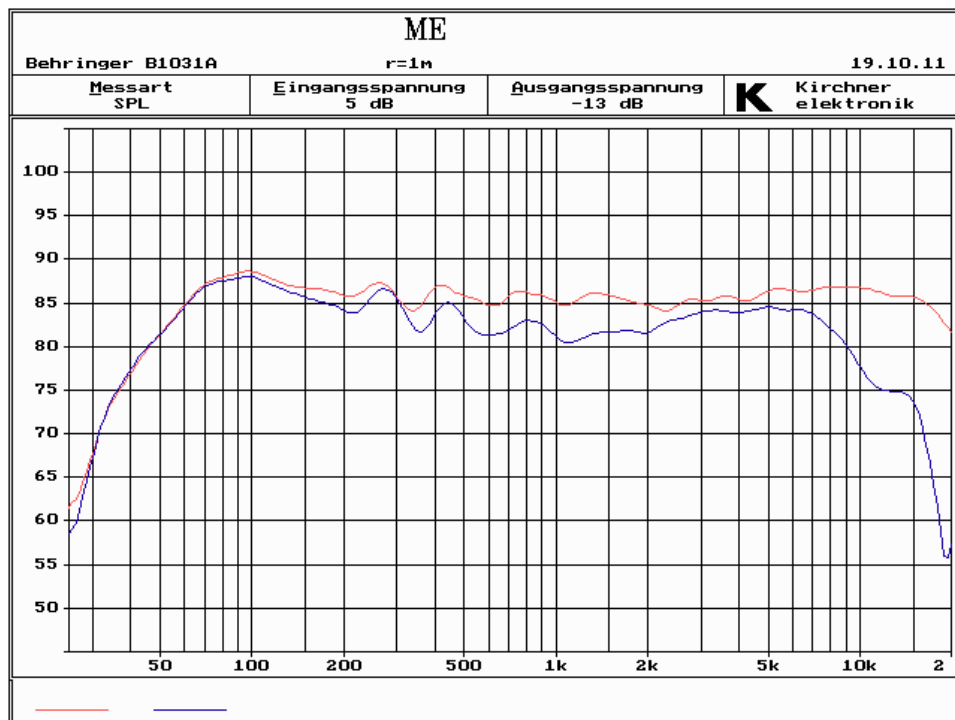


ADAM A5X - Klirrfaktoren bei Pa = 90 dB/1m SPL

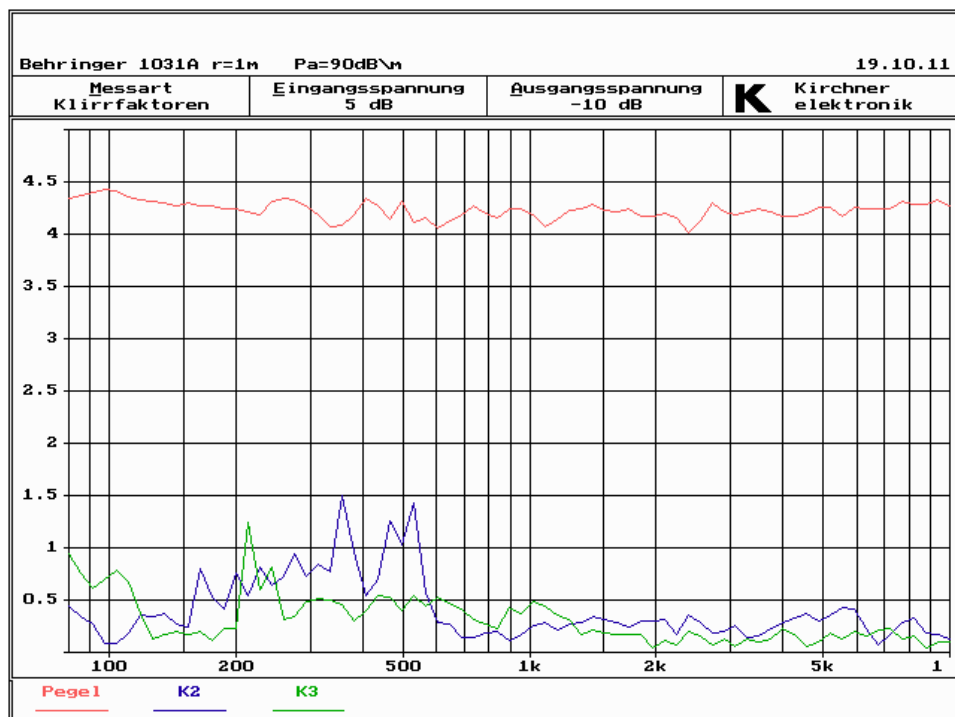


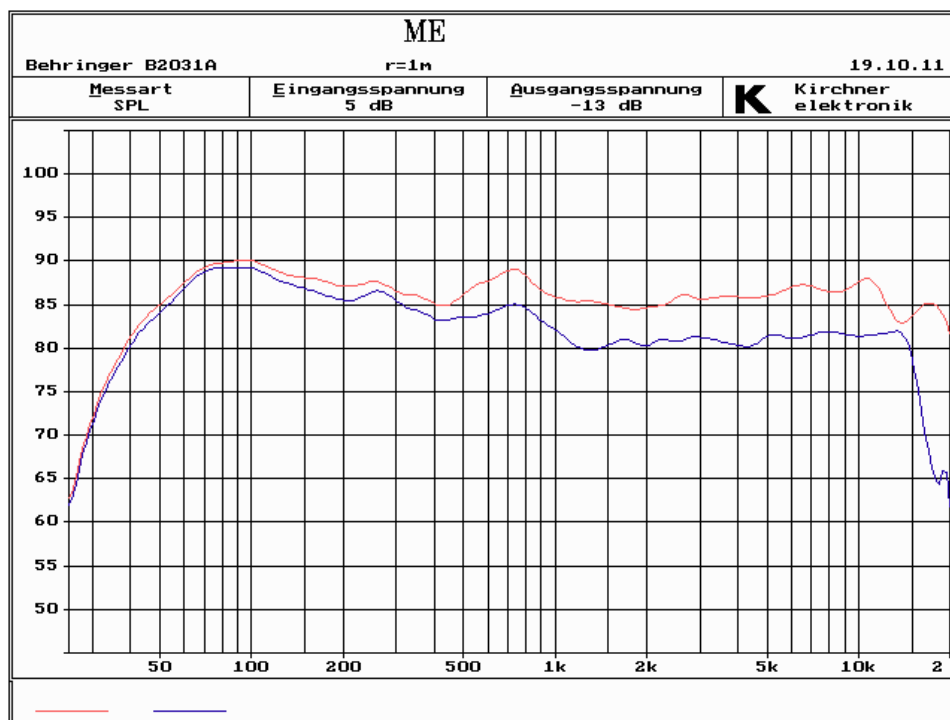
ADAM Artist 5 - Übertragungsverlauf

ADAM Artist 5 - Klirrfaktoren bei $P_a = 90 \text{ dB}/1m \text{ SPL}$

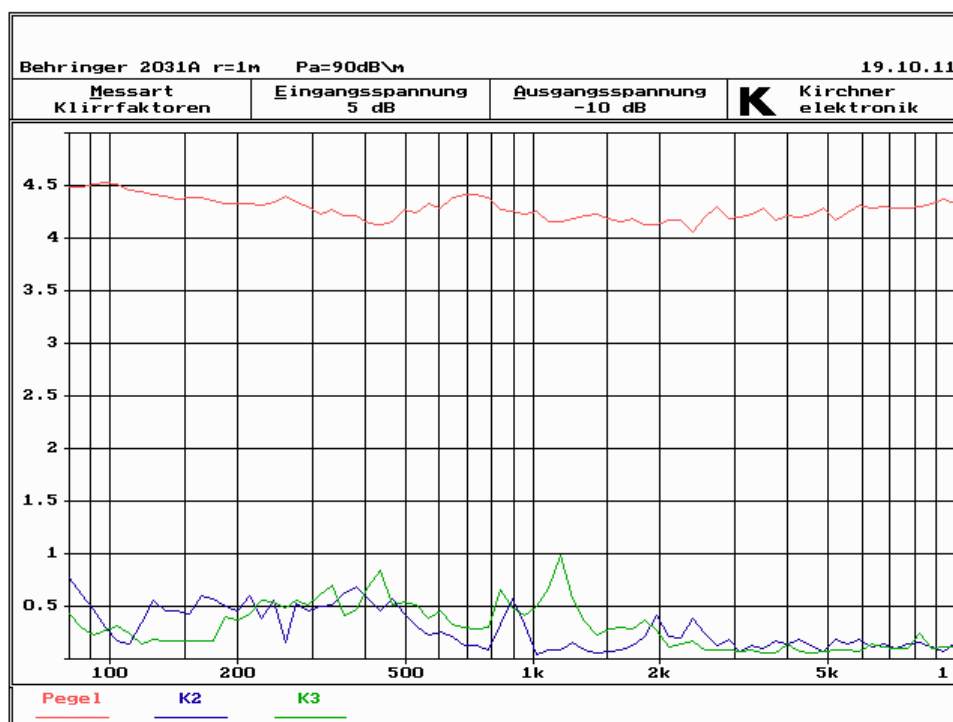


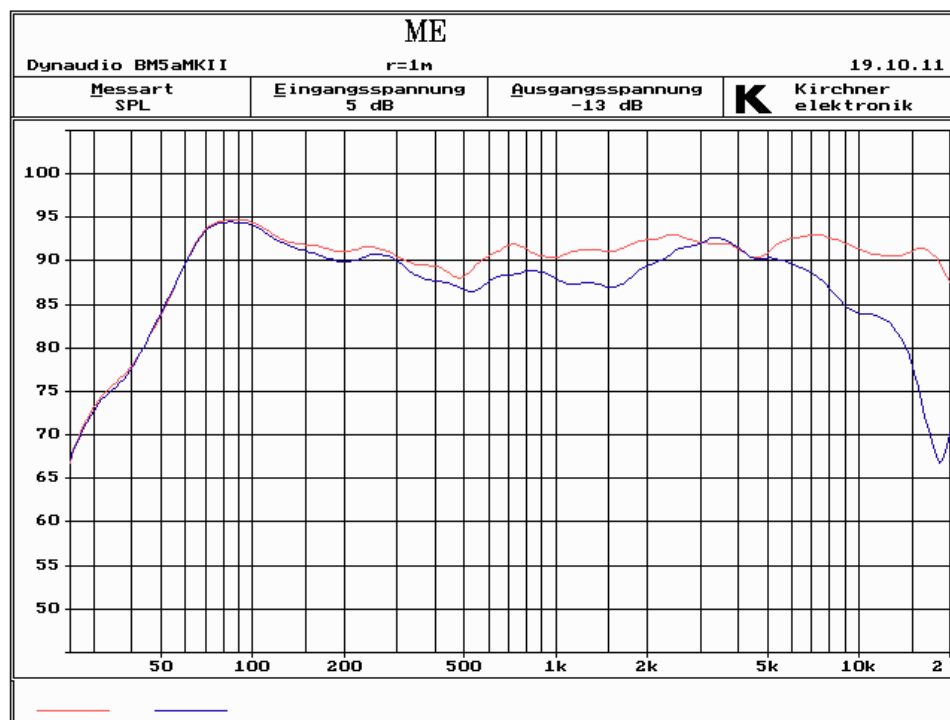
Behringer B1031A - Übertragungsverlauf

Behringer B1031A - Klirrfaktoren bei $P_a = 90 \text{ dB}/1m \text{ SPL}$

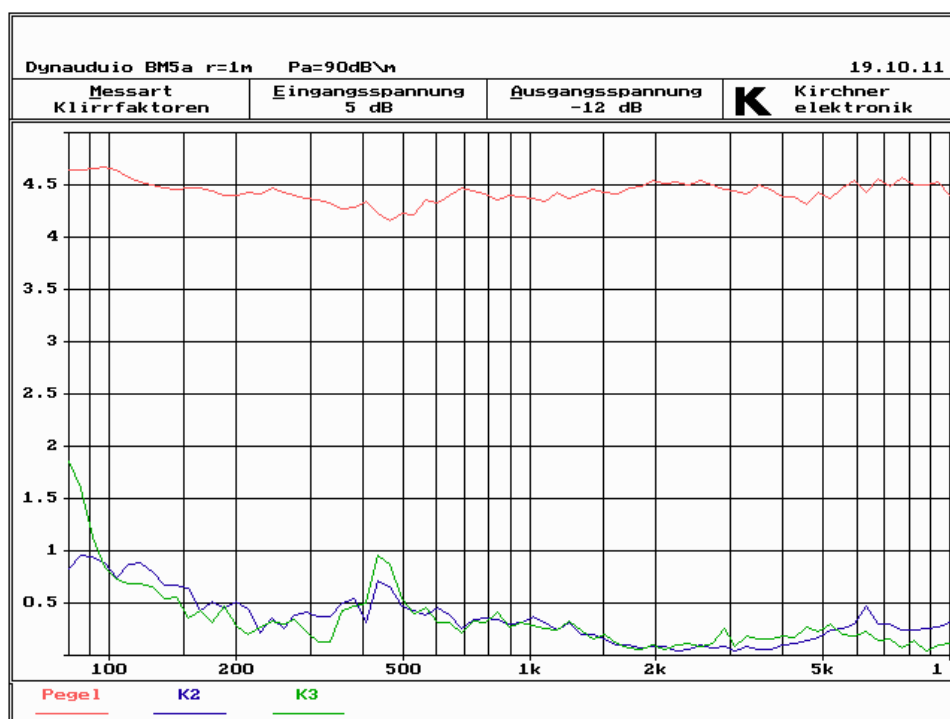


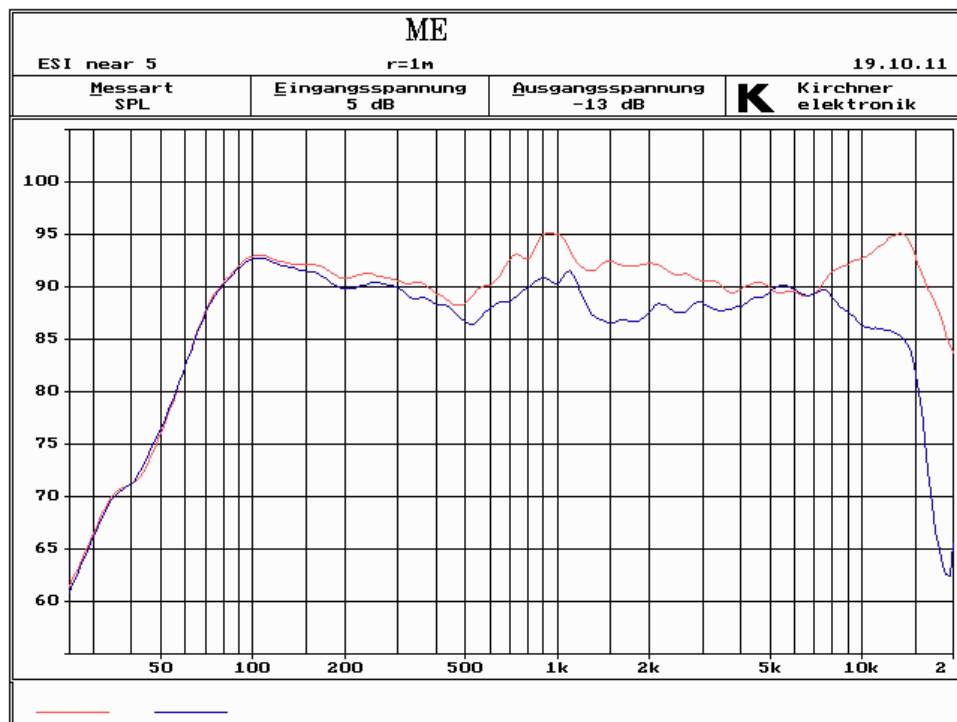
Behringer B2031A - Übertragungsverlauf

Behringer B2031A - Klirrfaktoren bei $P_a = 90 \text{ dB}/1m \text{ SPL}$

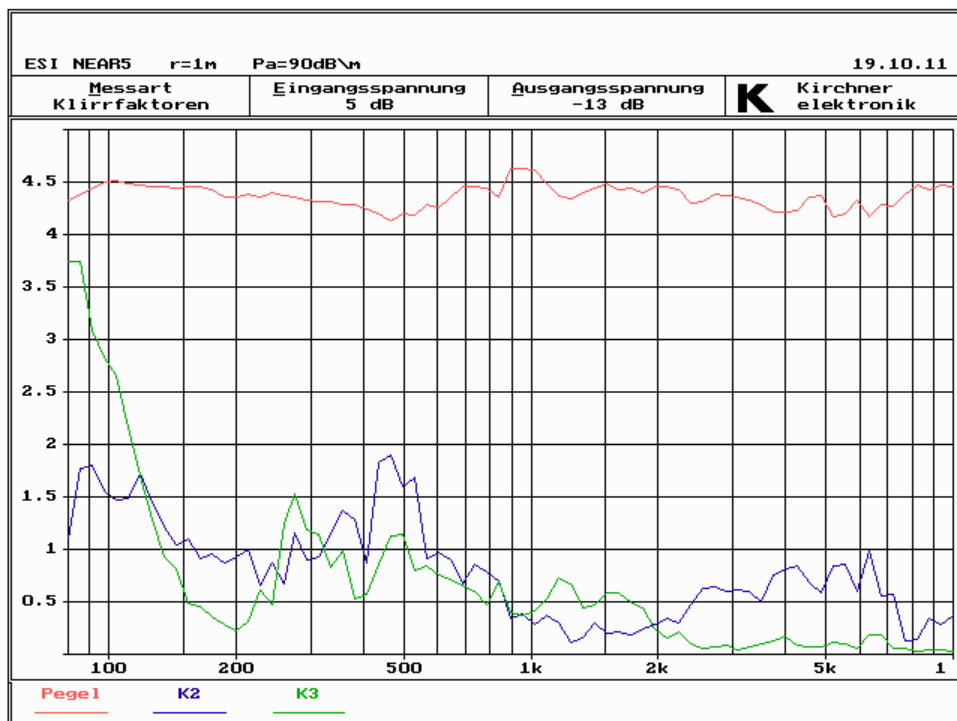


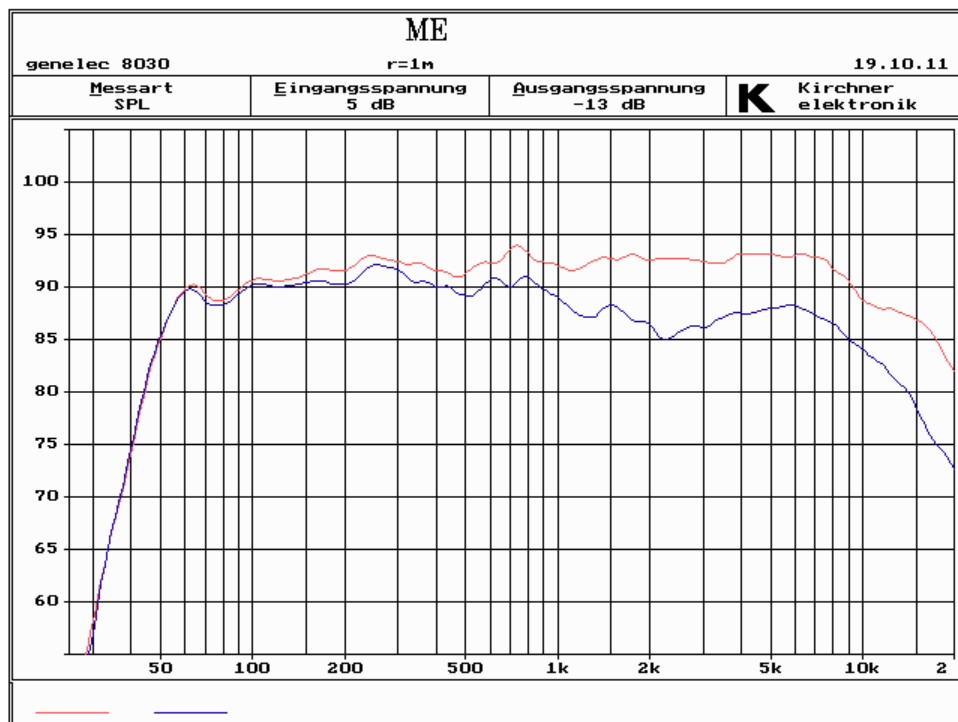
Dynaudio BM5a MKII - Übertragungsverlauf

Dynaudio BM5a MKII - Klirrfaktoren bei $P_a = 90 \text{ dB}/1m \text{ SPL}$

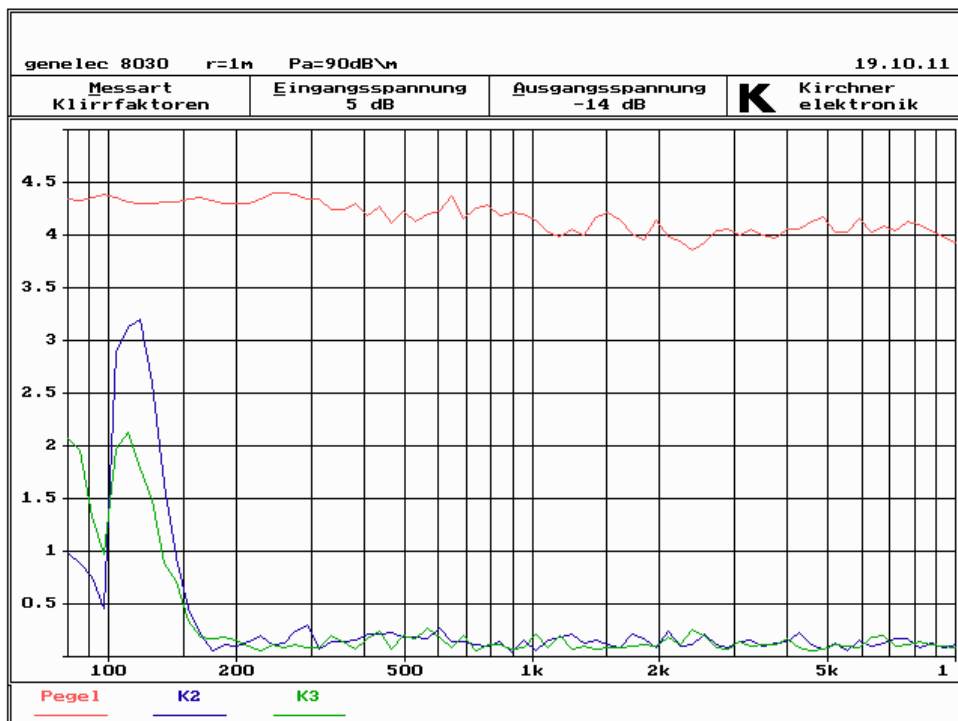


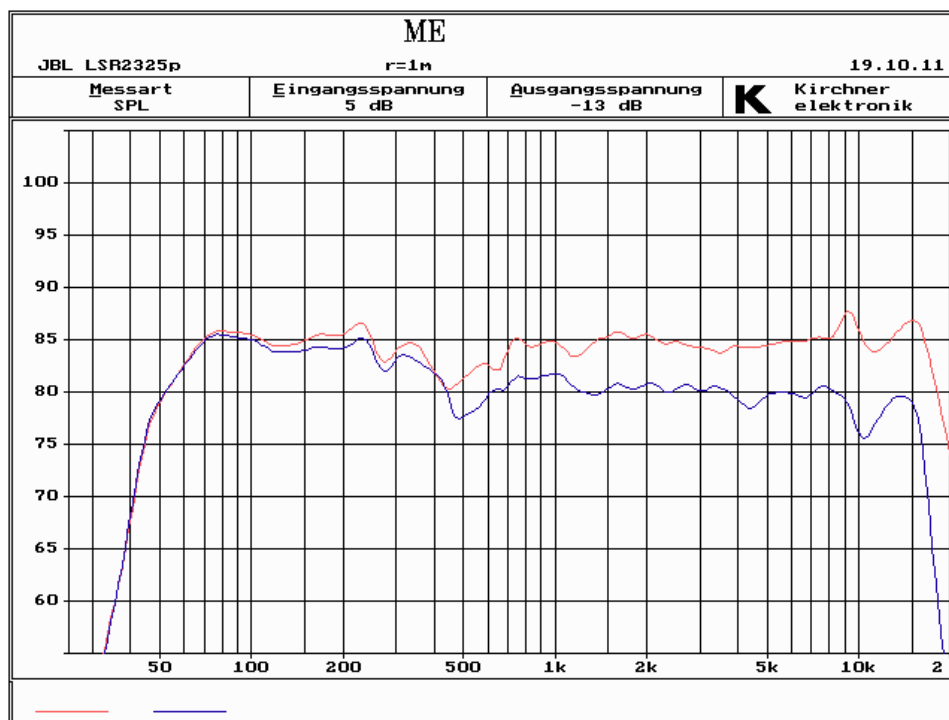
ESI nEar 05 eXperience - Übertragungsverlauf

ESI nEar 05 eXperience - Klirrfaktoren bei $P_a = 90 \text{ dB}/1m \text{ SPL}$

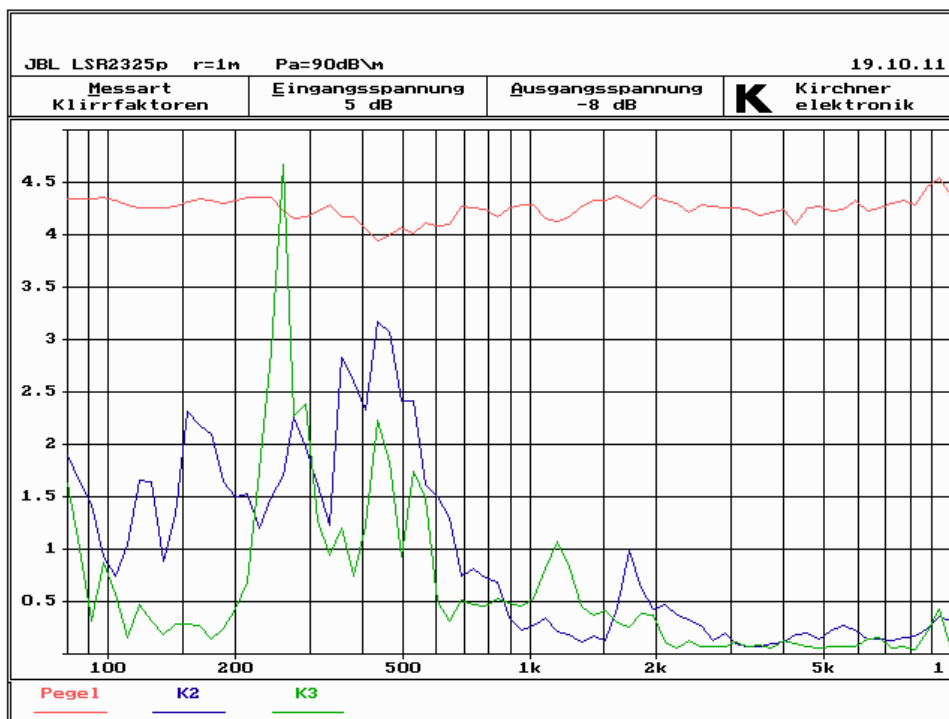


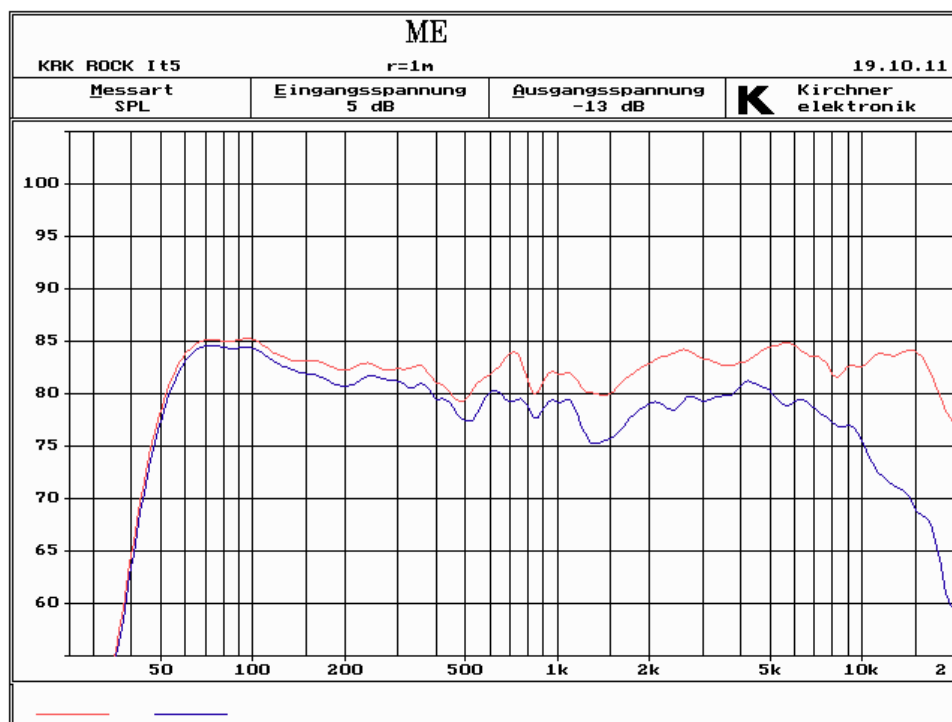
Genelec 8030APM - Übertragungsverlauf

Genelec 8030APM - Klirrfaktoren bei $Pa = 90 \text{ dB}/1m \text{ SPL}$

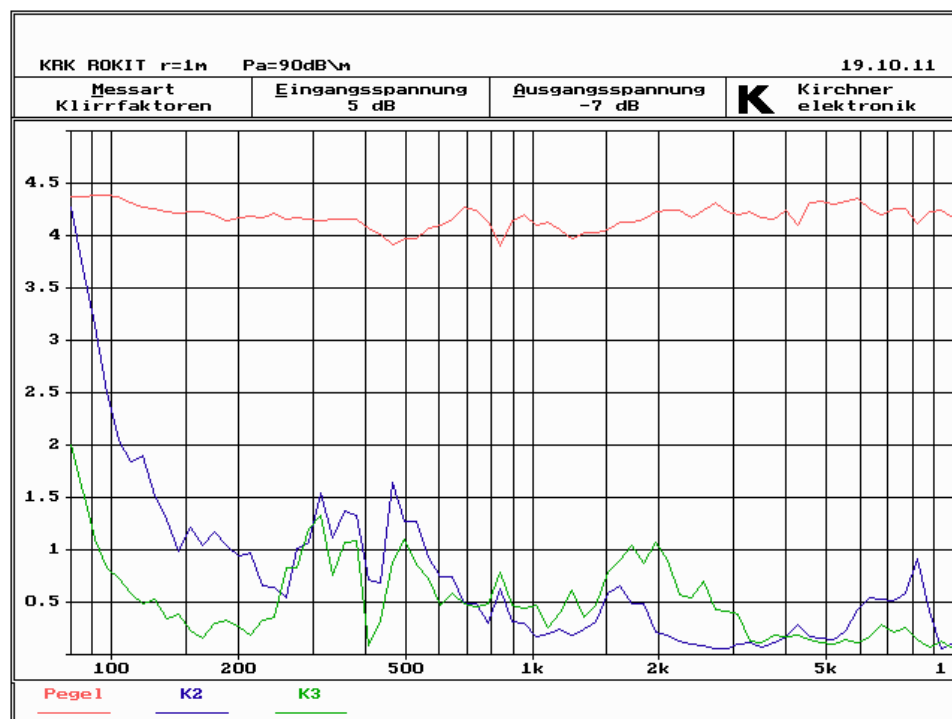


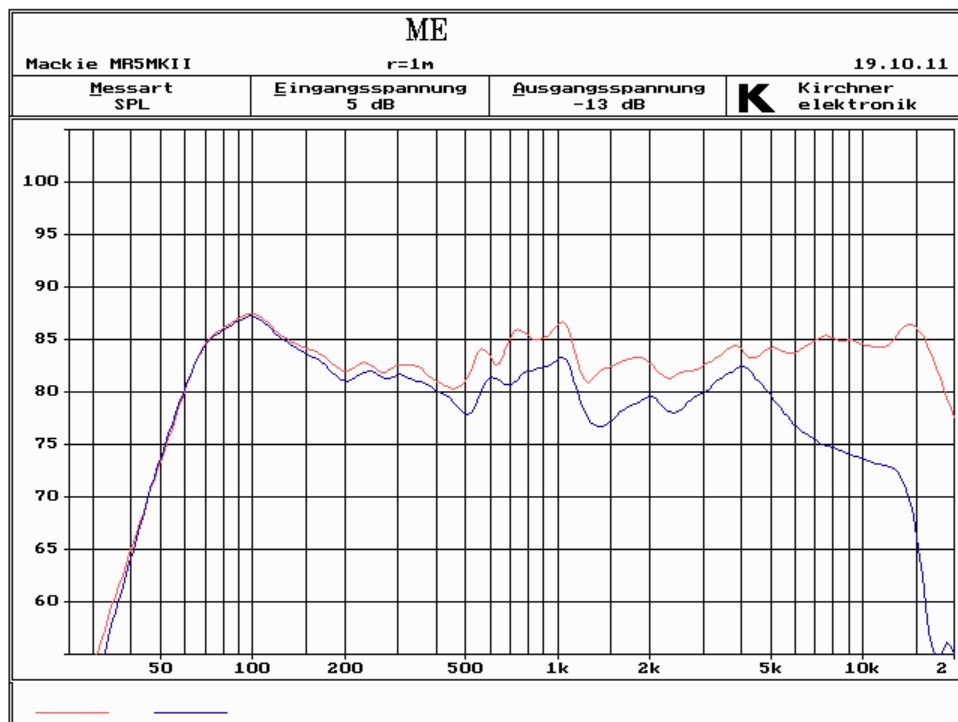
JBL LSR2325P - Übertragungsverlauf

JBL LSR2325P - Klirrfaktoren bei $P_a = 90 \text{ dB}/1m \text{ SPL}$

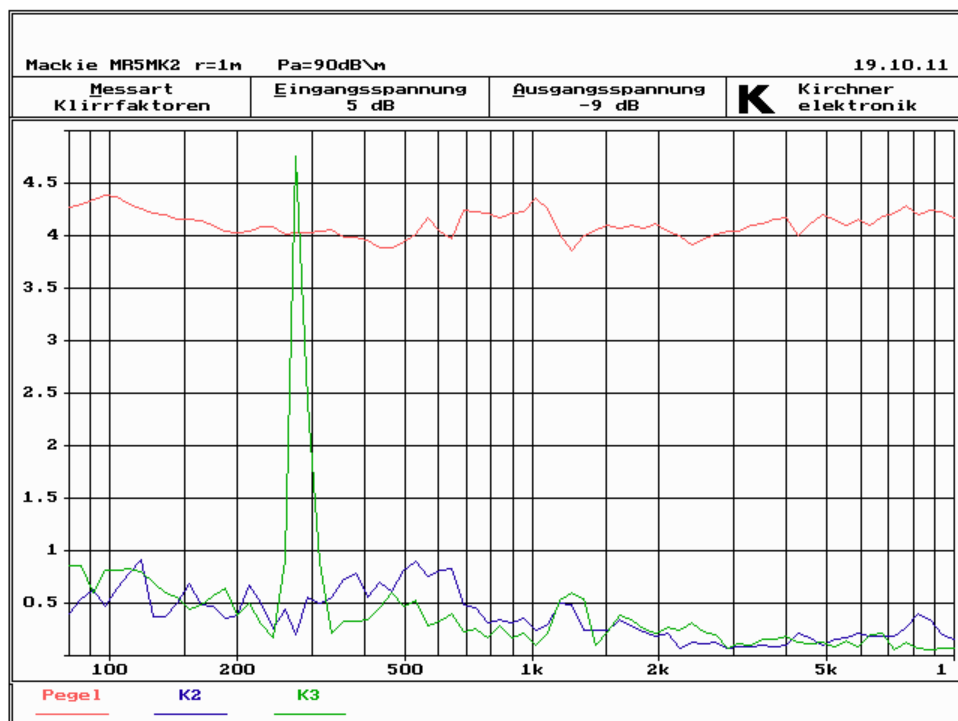


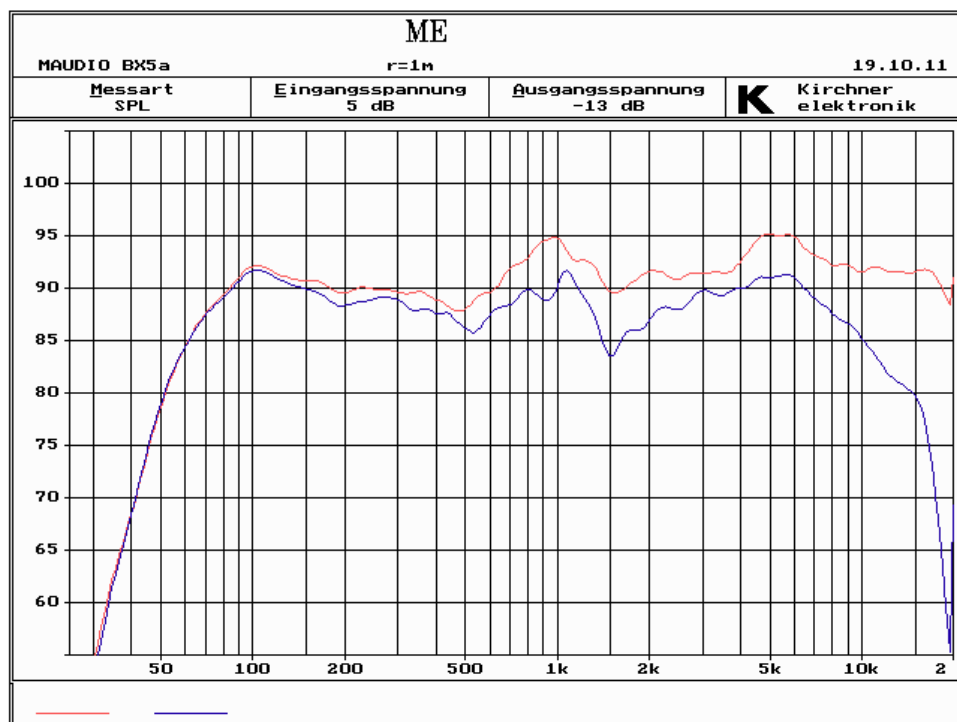
KRK Rokit RP5 G2 - Übertragungsverlauf

KRK Rokit RP5 G2 - Klirrfaktoren bei $Pa = 90 \text{ dB}/1m \text{ SPL}$

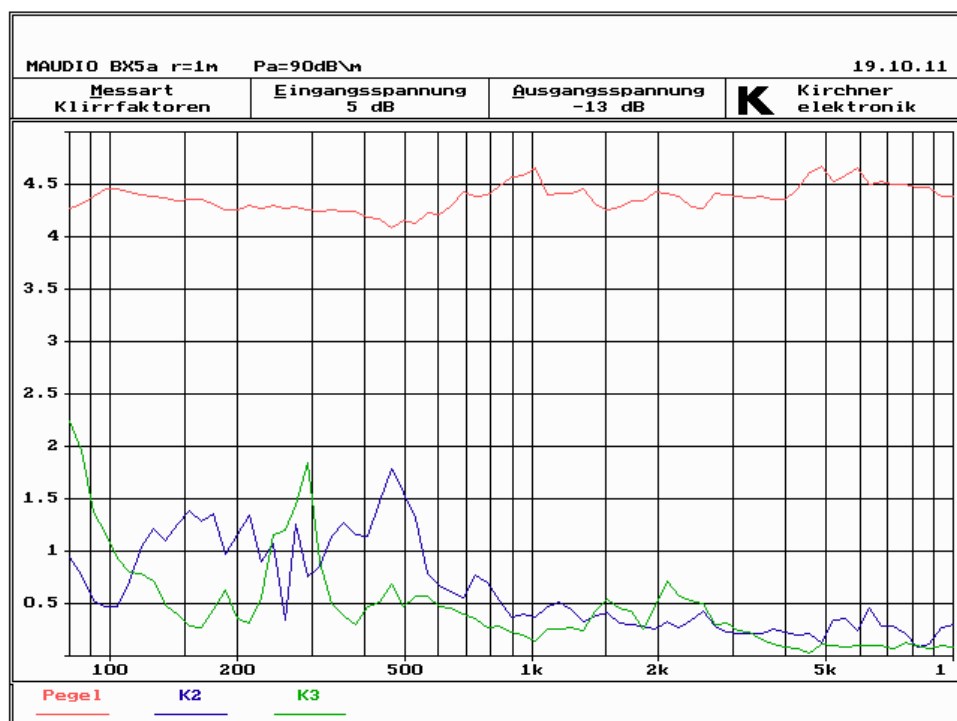


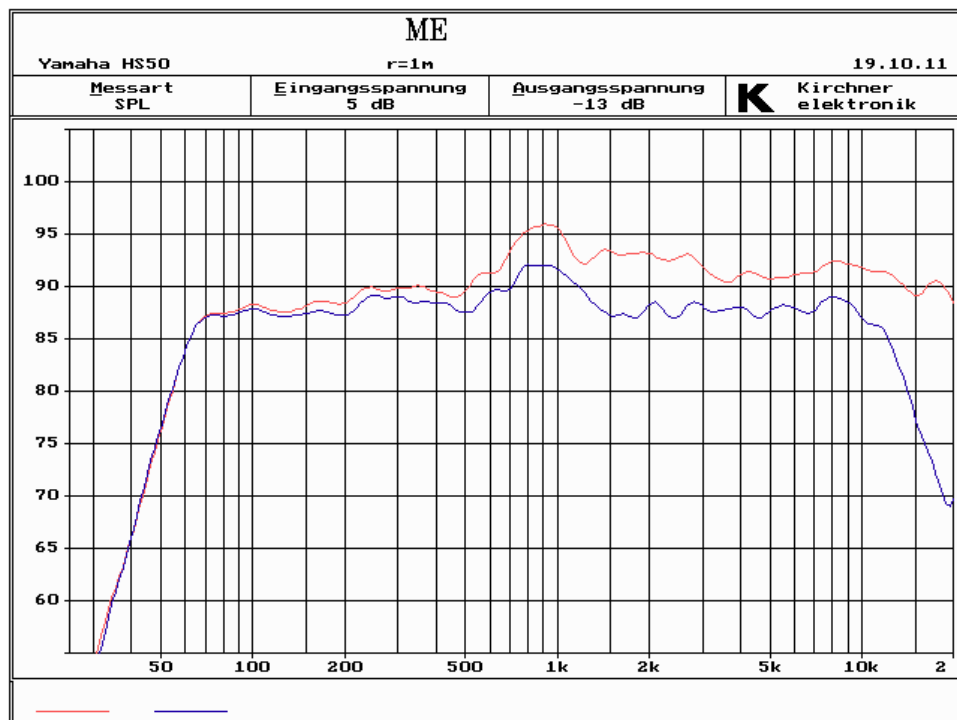
Mackie MR5MKII - Übertragungsverlauf

Mackie MR5MKII - Klirrfaktoren bei $P_a = 90 \text{ dB}/1m \text{ SPL}$

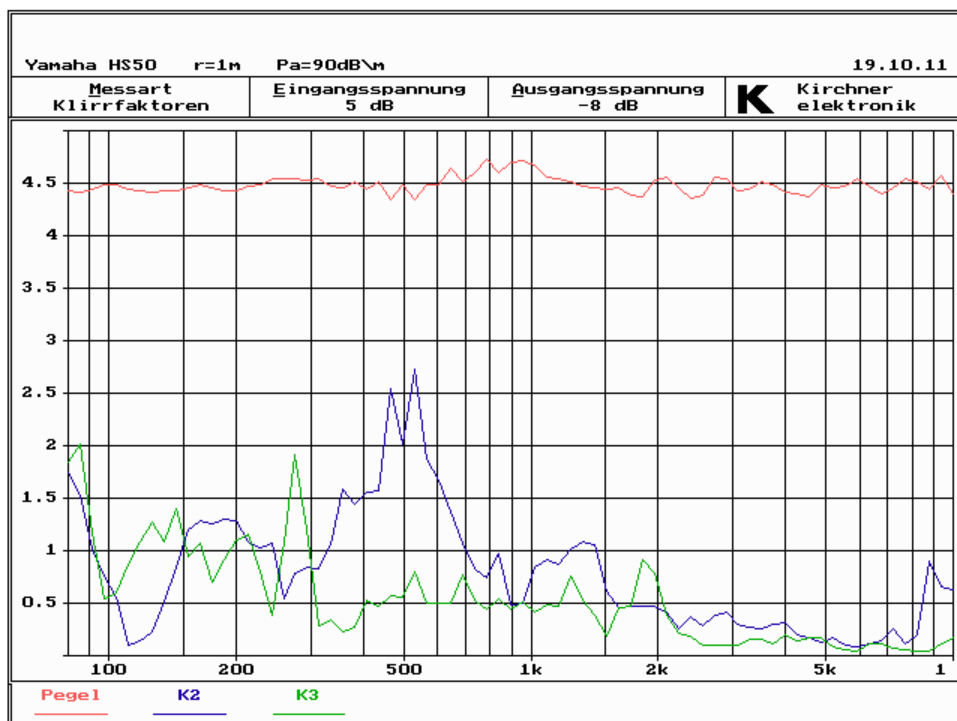


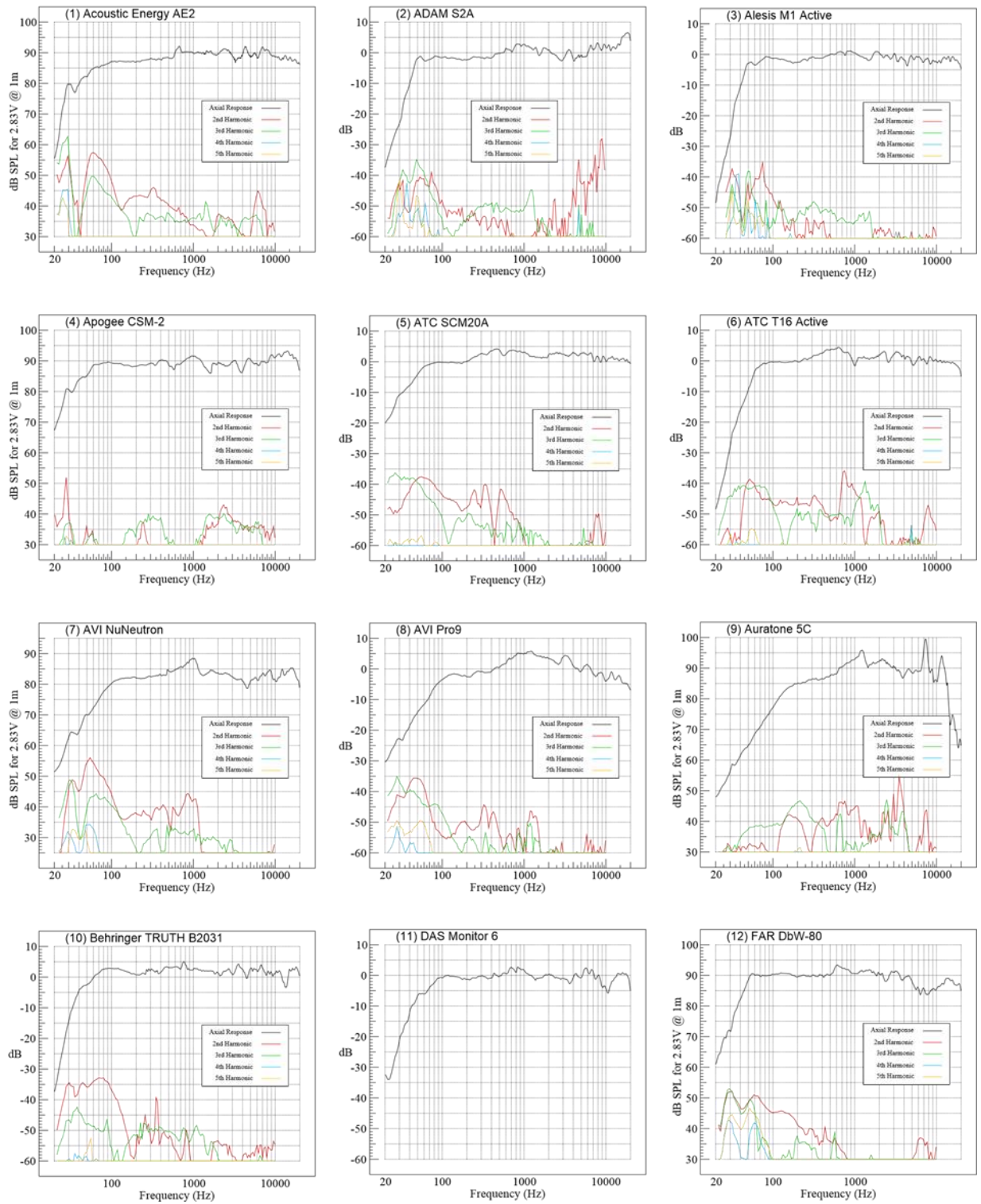
M-Audio BX5A - Übertragungsverlauf

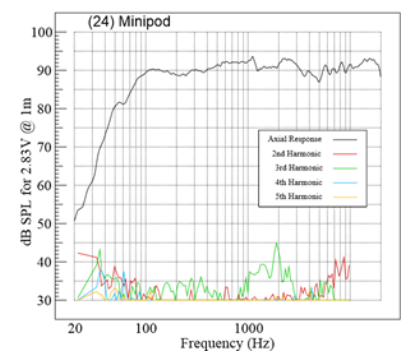
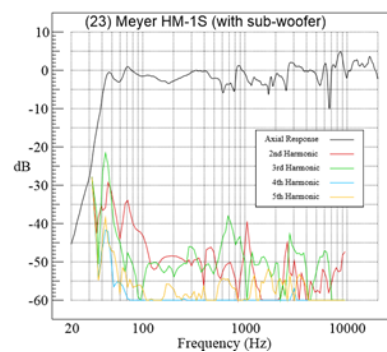
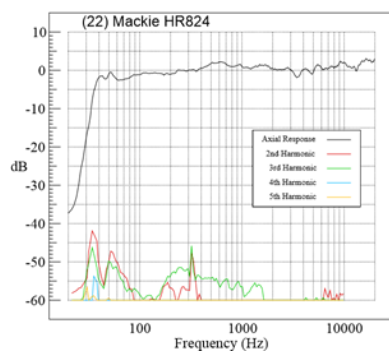
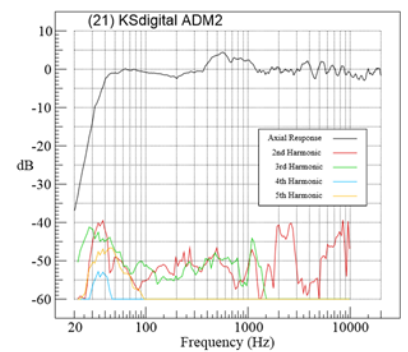
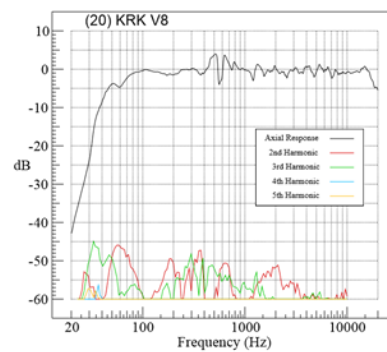
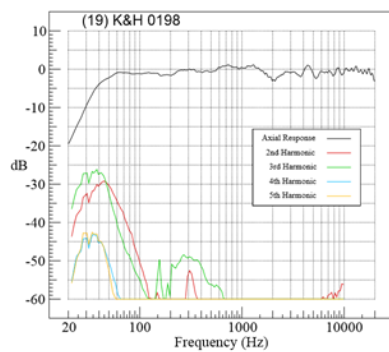
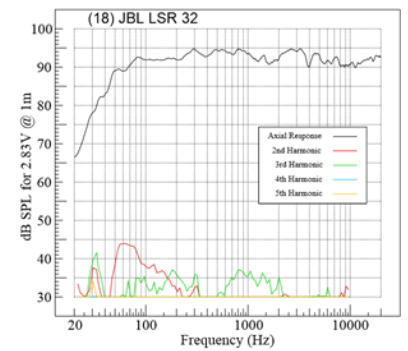
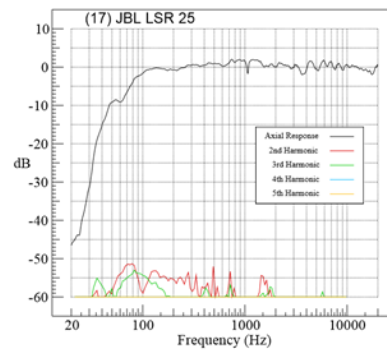
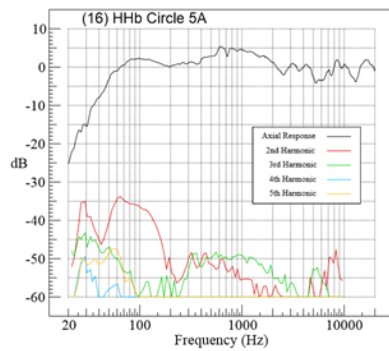
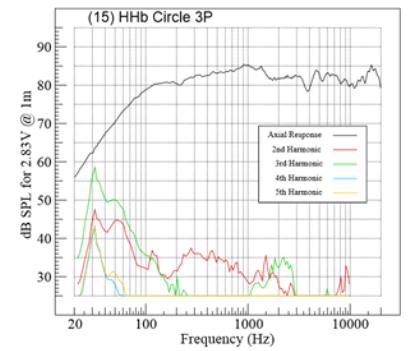
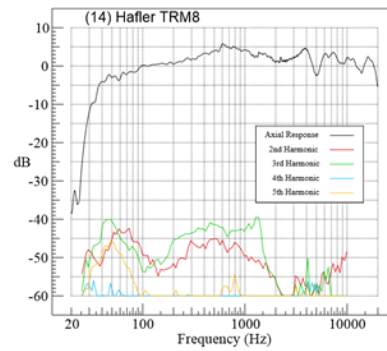
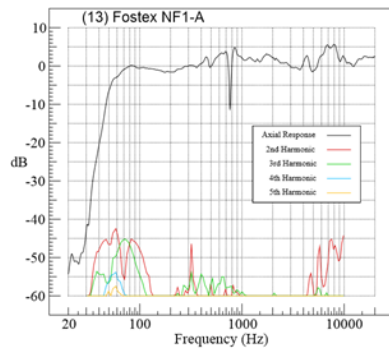
M-Audio BX5A - Klirrfaktoren bei $P_a = 90 \text{ dB}/1m \text{ SPL}$

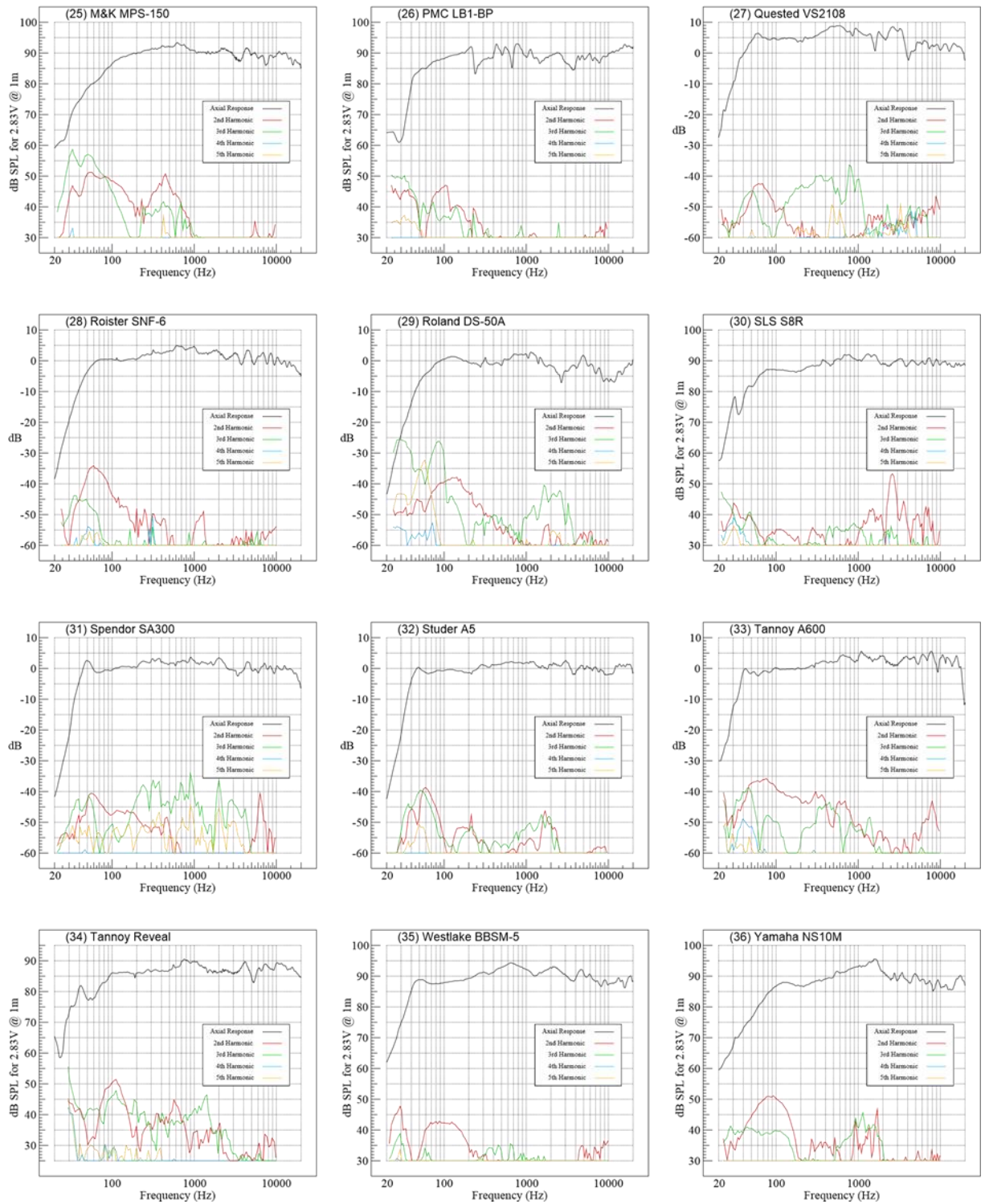


Yamaha HS50 - Übertragungsverlauf

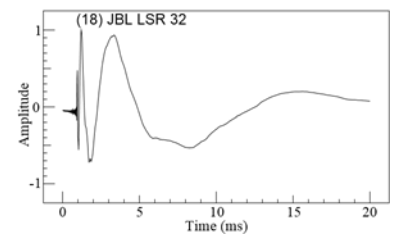
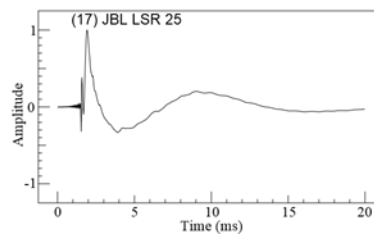
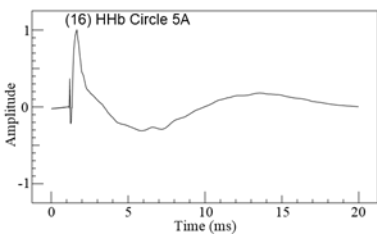
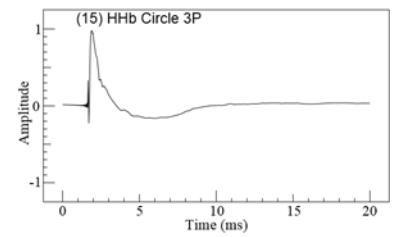
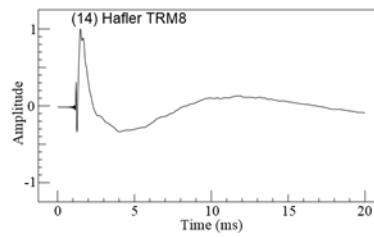
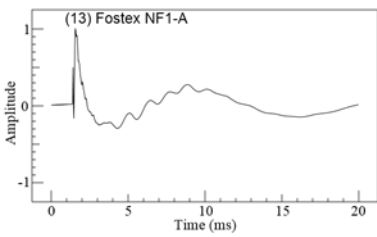
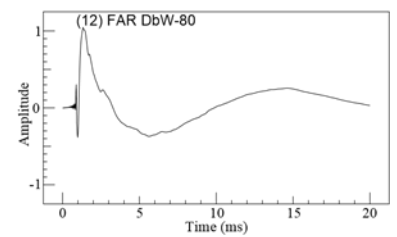
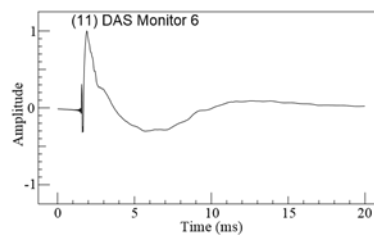
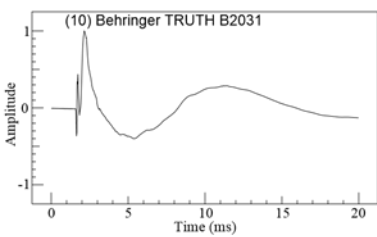
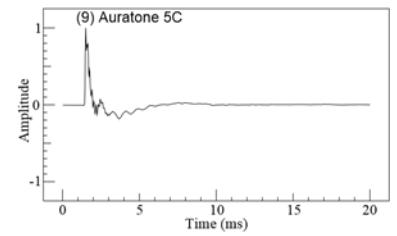
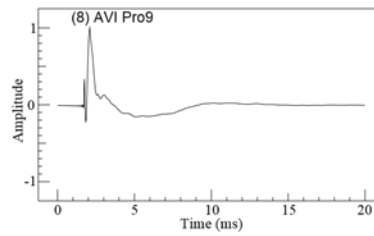
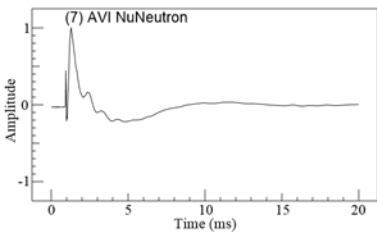
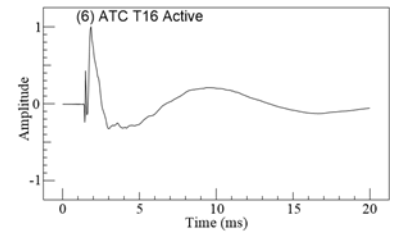
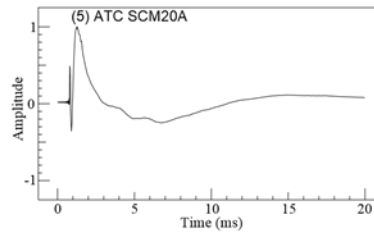
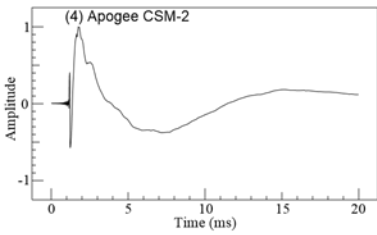
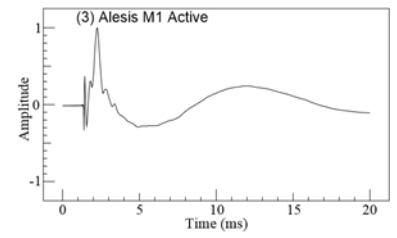
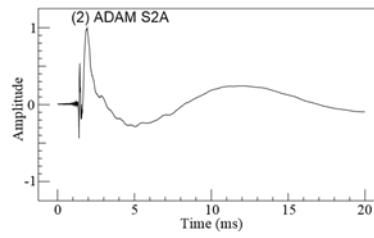
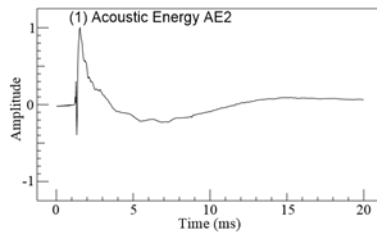
Yamaha HS50- Klirrfaktoren bei $P_a = 90 \text{ dB}/1m \text{ SPL}$

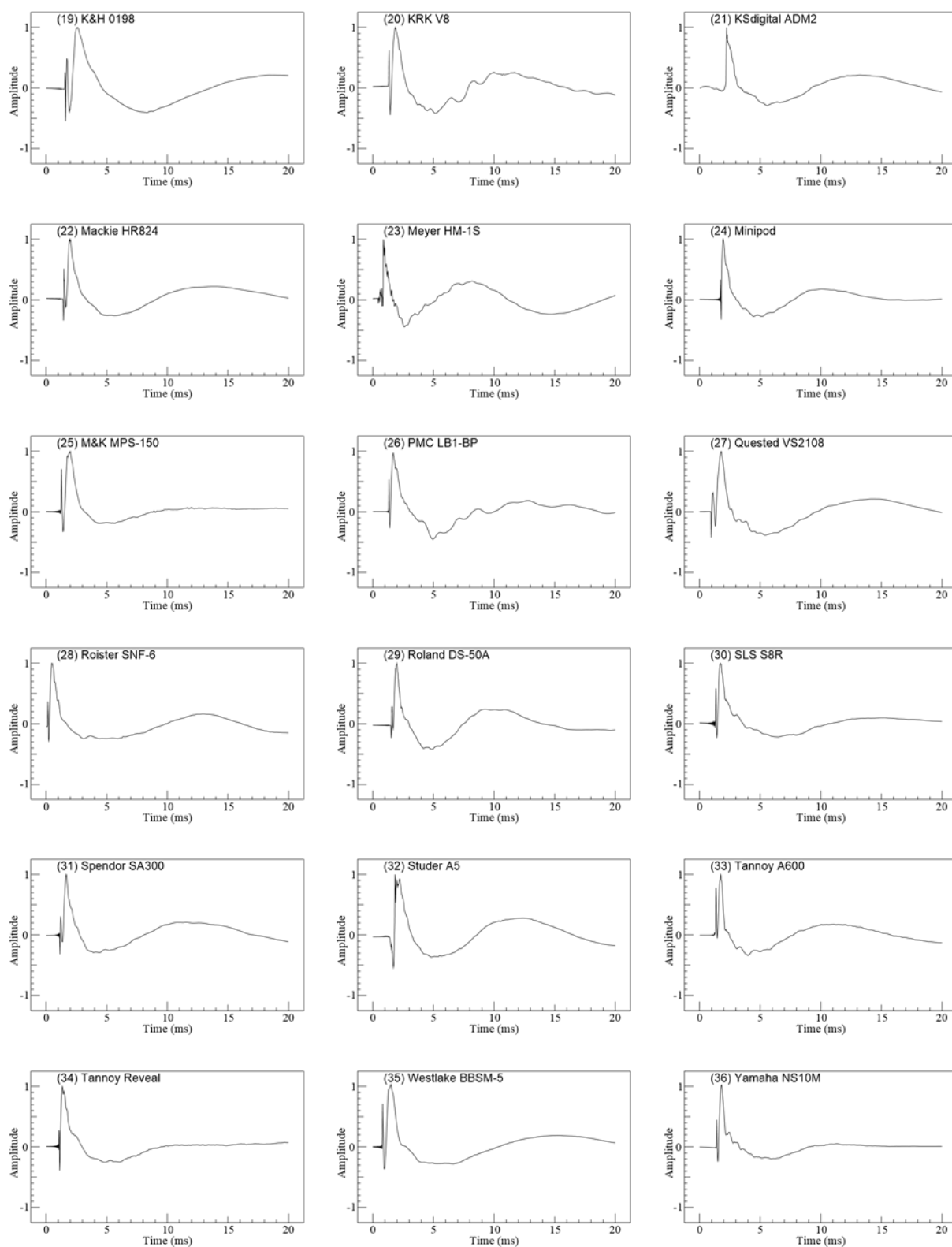




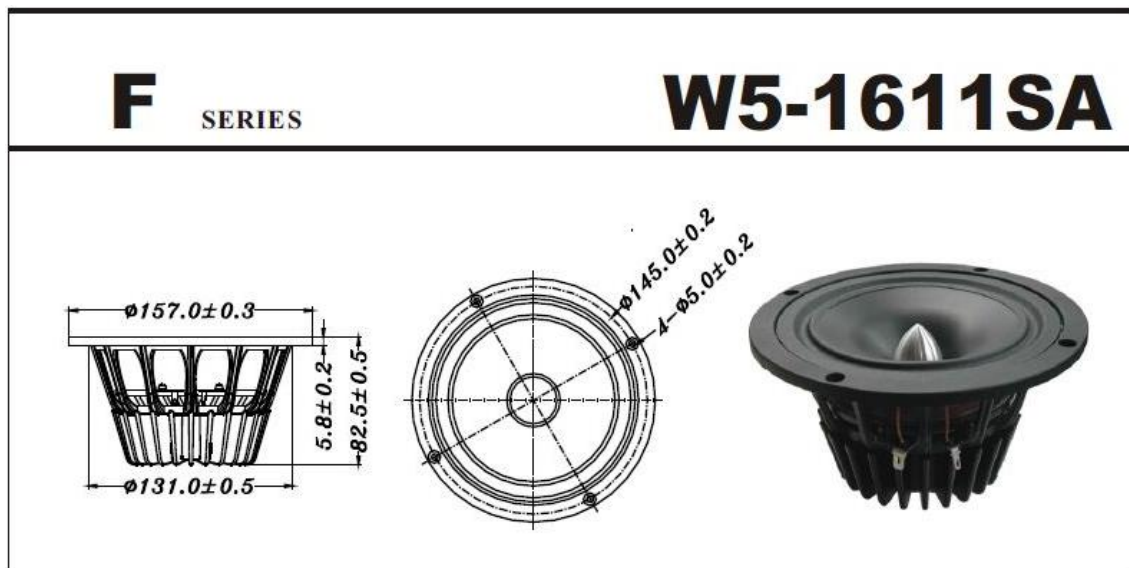


B.2 Sprungantworten





C W5-1611SA Daten und Referenzmessungen



- FULL RANGE DESIGN
- BLACK COLOR PP CONE WITH WIDE RANGE TEMPERATURE, HIGH LOSS RECIPE OF RUBBER SURROUND
- VENTED POLE PIECE, NON-COMPROMISED UNDERHUNG NEODYMIUM MAGNET WITH ALUMINUM DIE CAST HEAT SINK
- GF REINFORCED NYLON BASKET



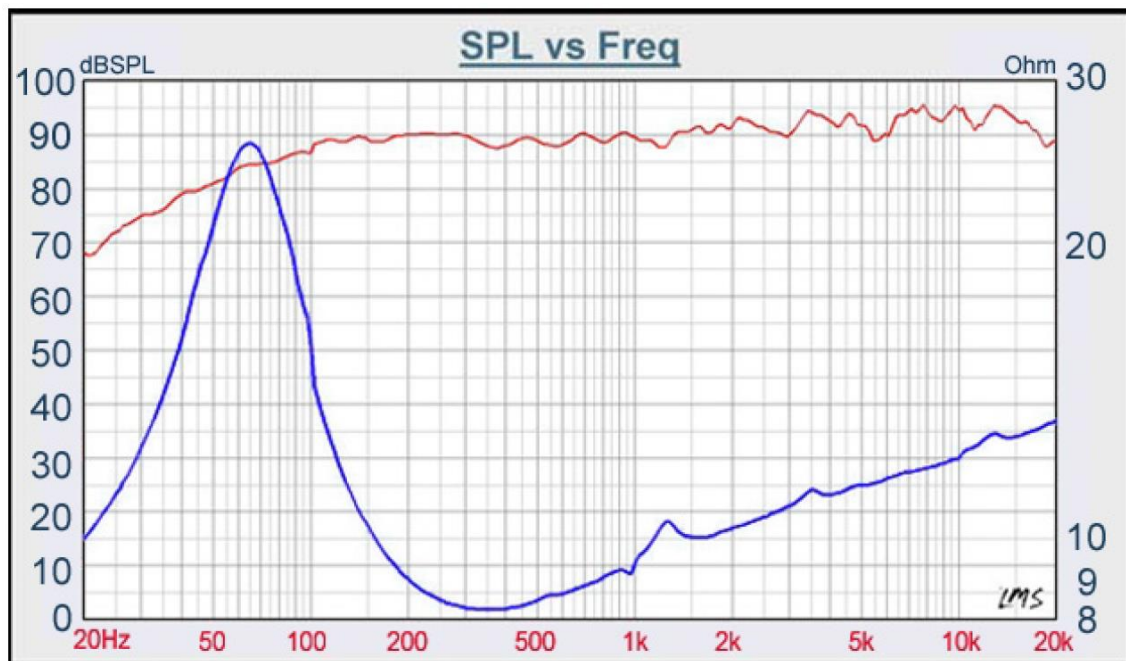
5" PP FULL RANGE

DIAPHRAGM MTL	Black color pp
SURROUND MTL	Rubber
NOMINAL IMPEDANCE	8 Ω
DCR IMPEDANCE	6.8 Ω
SENSITIVITY 1W/1m	90 dB
FREQUENCY RESPONSE	60 - 20 KHz
FREE AIR RESONANCE	60 Hz
VOICE COIL DIAMETER	25.4 mm
AIR GAP HEIGHT	10 mm
RATED POWER INPUT	28 W
MAXIMUM POWER INPUT	56 W
FORCE FACTOR, BL	5.18 TM
MAGNET WEIGHT (oz)	Neodymium
MOVING MASS	5.76g
FERROFLUID ENHANCED	No
SUSPENSION COMPLIANCE	1307 MN ⁻¹
EFFECTIVE PISTON AREA	0.0094 M ²
Levc	0.11mh
Zo	32 ohm
X-max	3mm
Vas	13.02 Litr
Qts	0.44
Qms	1.67
Qes	0.60

TB SPEAKERS

VOICE: 886.2.26570282 FAX: 886.2.26580166
E-MAIL: info@tb-speaker.com

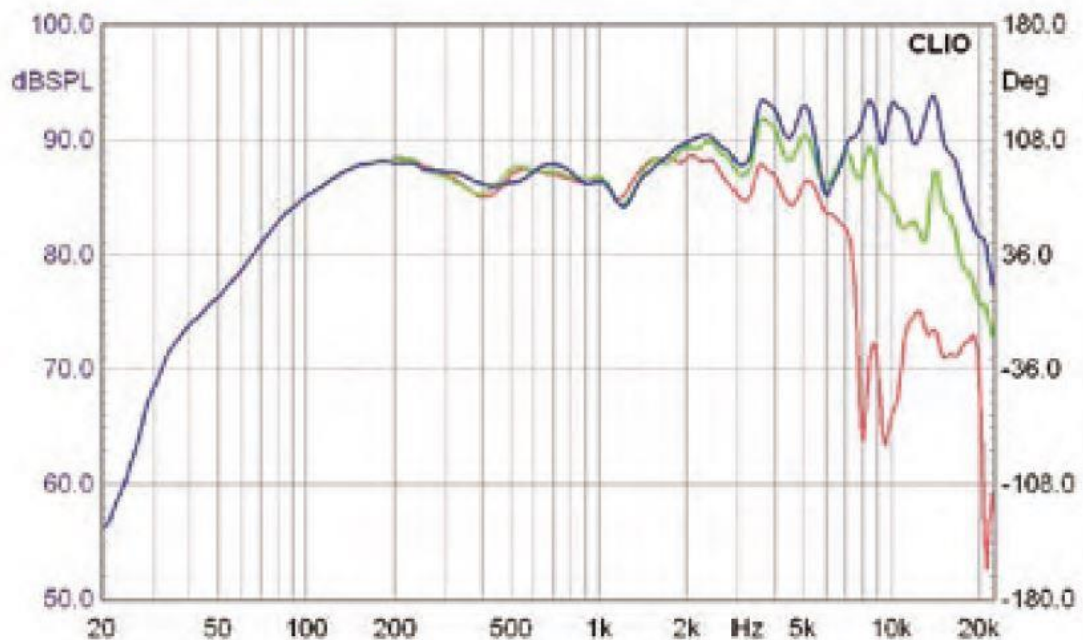
C.1 Frequenz- und Impedanzverlauf von Tang Band



TB-Speakers, o.J.

C.2 W5-1611SA in 1000-Liter-Testbox mit 1,35 x 1,65 m IEC-Normwand

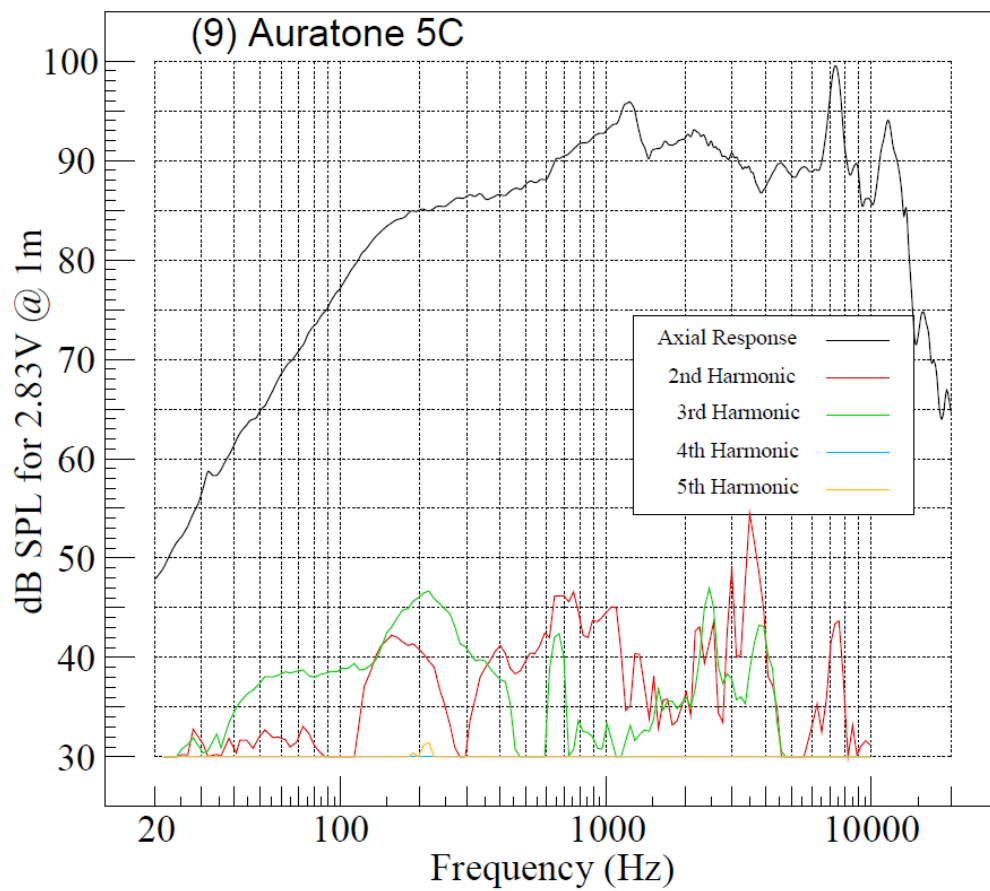
Frequenzgang für 0/15/30



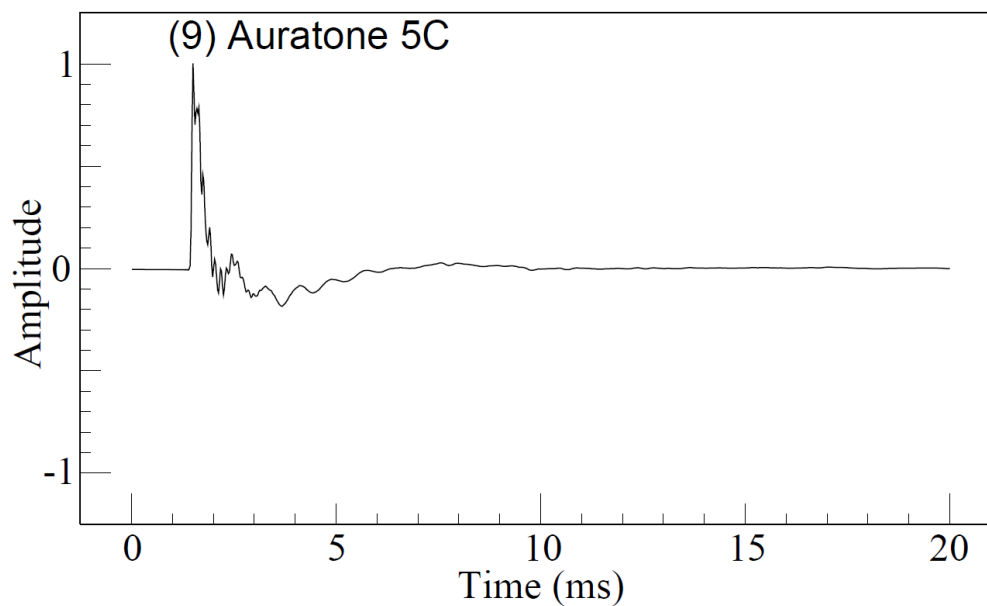
Klang + Ton, 2008

D Frequenzgänge verschiedener Studiobreitbänder

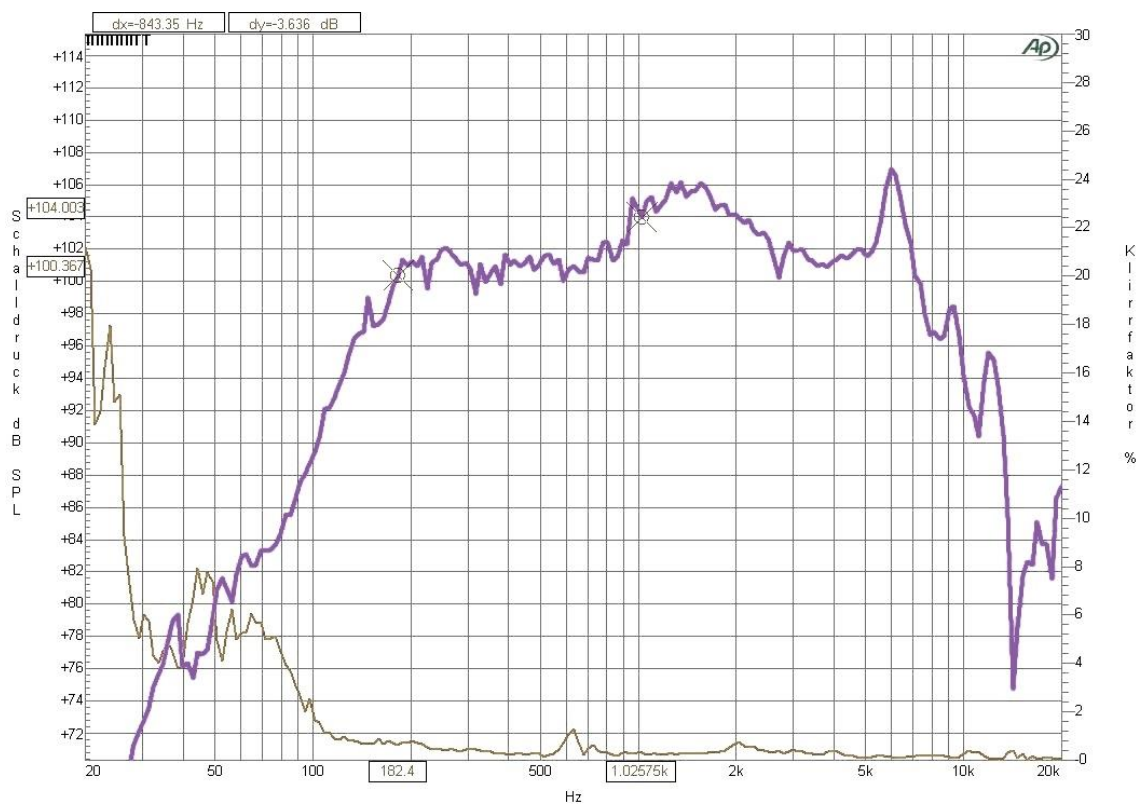
D.1 Auratone 5C – Übertragungsverlauf und Klirr



D.2 Auratone 5C – Sprungantwort

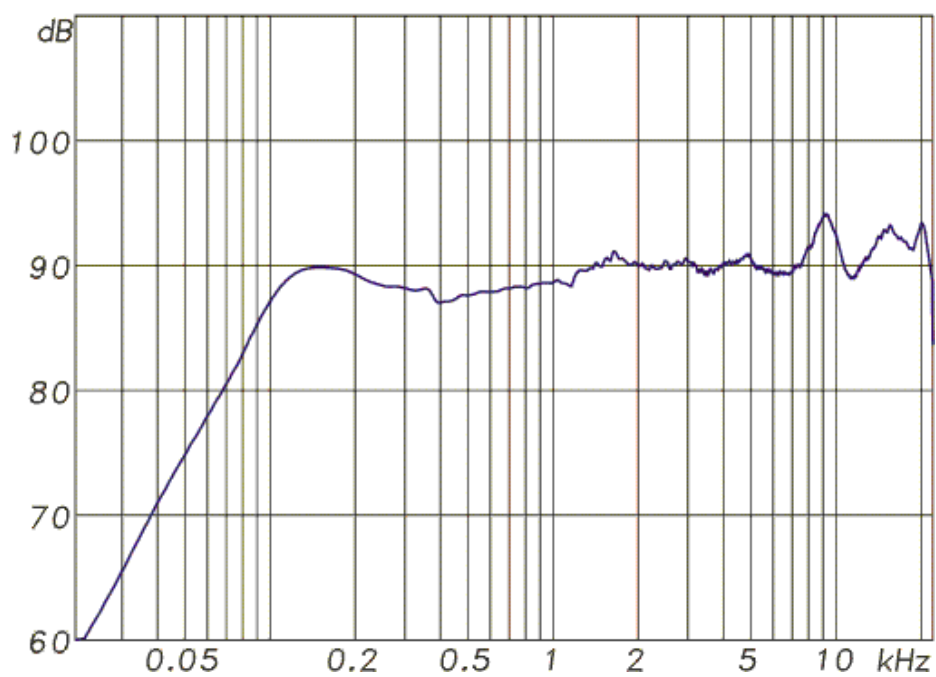


D.3 Avantone Mixcube – Übertragungsverlauf und Klirr



Amazona, 2008

D.4 Neumann M52 – Übertragungsverlauf



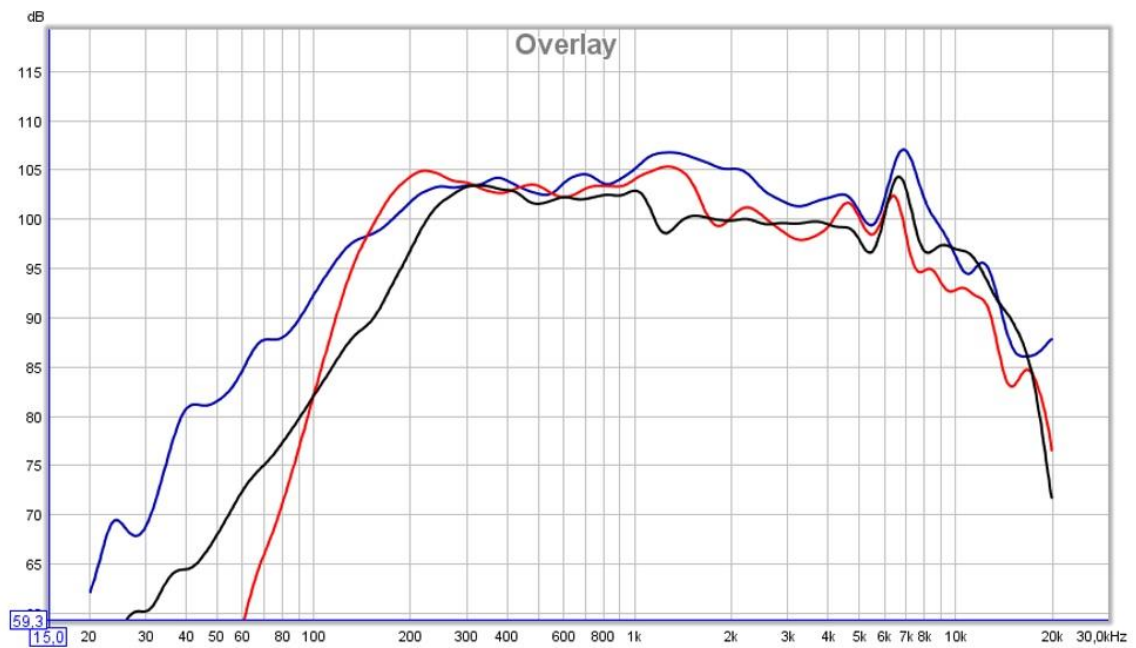
Neumann, o.J.

D.5 Behringer Behritone C5a; C50a; Auratone 5C – Vergleich

Behringer C5a **rot**

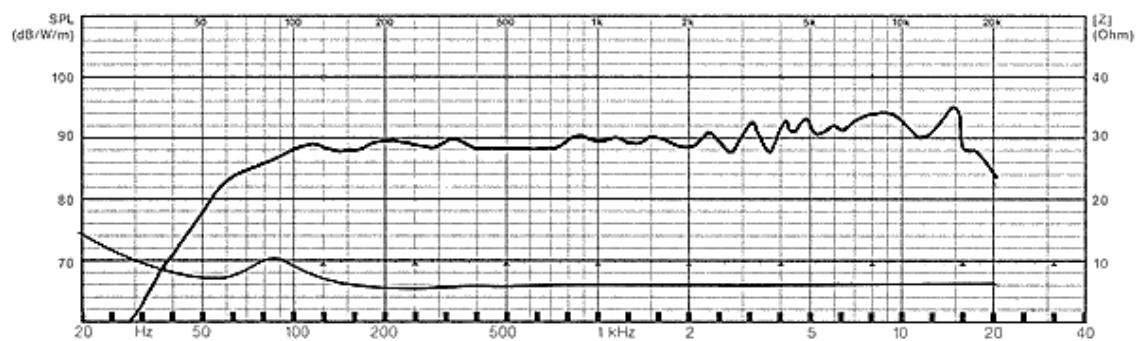
Behringer C50a **blau**

Auratone 5C **schwarz**



Tools4music, 2012

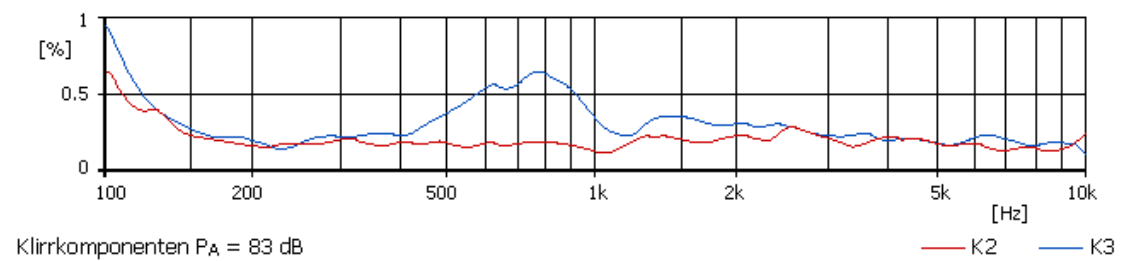
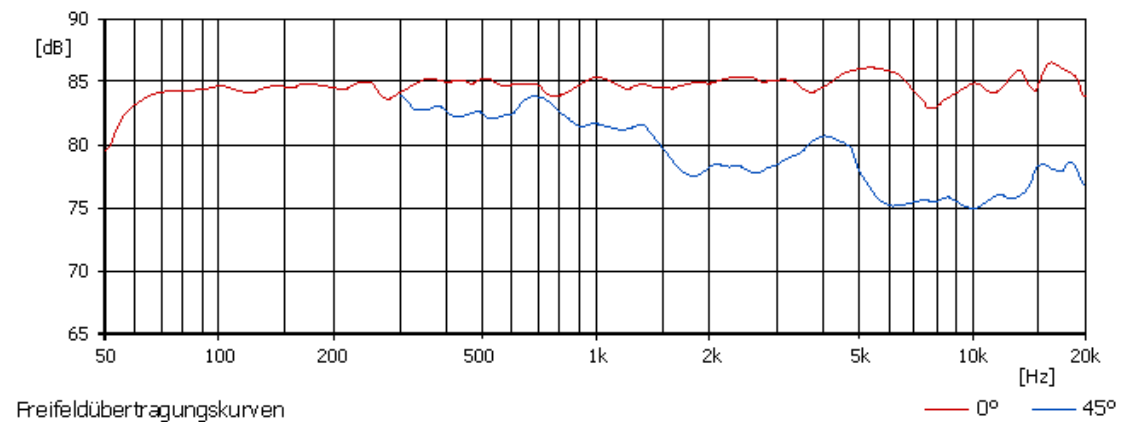
D.6 Visatone SOLO 20 (HiFi-Bausatz) – Übertragungsverlauf



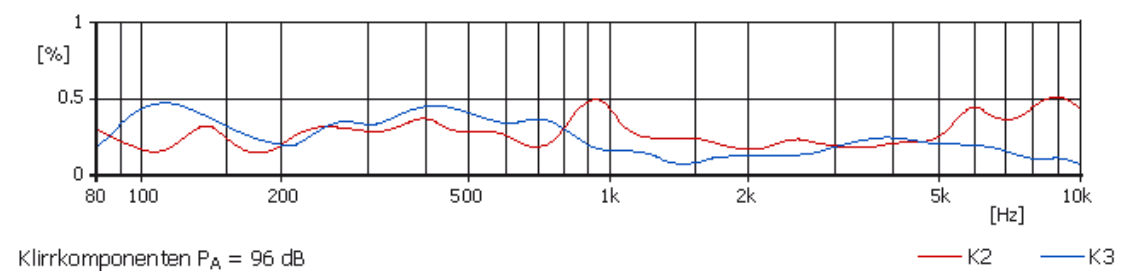
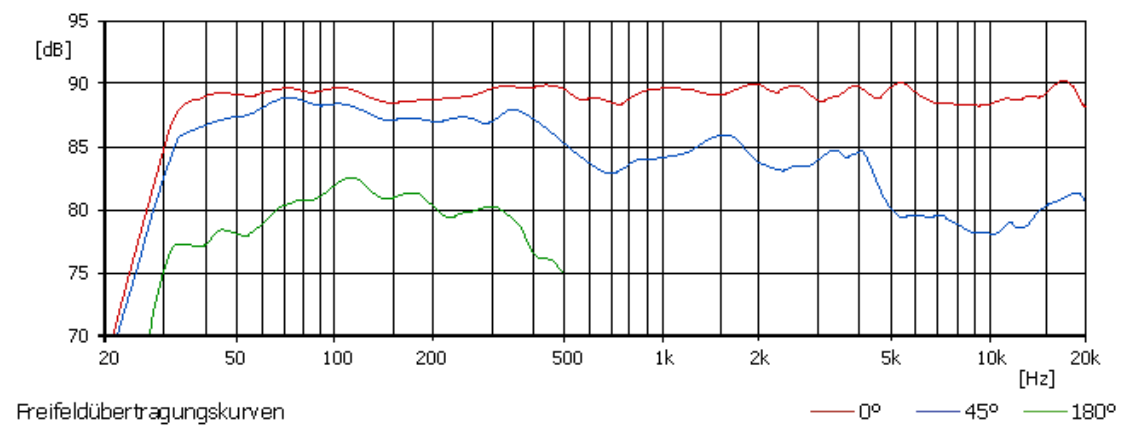
Visaton, o.J.

E Regielautsprecher von Musikelectronic Geithain

E.1 RL906



E.1 RL933K



ME-Geithain, o.J.

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ort, Datum

Vorname Nachname